



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DIFERENTES ENFOQUES EN LA CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA DE LA EXPOSICIÓN FRENTE A EVENTOS DE INUNDACIÓN FLUVIAL. APLICACIÓN AL CASO DE LA CIUDAD DE PAMPLONA Y ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Trabajo realizado por:

Marta Fresán Sánchez de Muniain

Dirigido:

Saúl Torres Ortega

Pedro Díaz Simal

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, Septiembre de 2018

TRABAJO FINAL DE MASTER



TÍTULO:

Diferentes enfoques en la caracterización socioeconómica de la exposición frente a eventos de inundación fluvial. Aplicación al caso de la ciudad de Pamplona y estudio de los efectos del cambio climático.

AUTOR:

Marta Fresán Sánchez de Muniáin

DIRECTORES;

Saúl Torres Ortega, Pedro Díaz Simal

CONVOCATORIA:

Septiembre 2018

PALABRAS CLAVE:

Exposición, vulnerabilidad, población, activos residenciales, análisis de riesgo, amenaza, mancha de inundación, periodo de retorno, enfoque.

REFERENCIAS PRINCIPALES:

Banco Mundial. 2013. Modelización probabilística para la gestión del riesgo de desastres. El caso de Bogotá, Colombia.

COAG. 2004. Natural Disasters in Australia. Reforming Mitigation, Relief and Recovery Arrangements.

Gobierno de España. 2016. Informe de seguimiento del plan de gestión del riesgo de inundación de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro.

Perles Rosello. 2010. Apuntes para la evaluación de la vulnerabilidad social frente al riesgo de inundación.

Bescós y Camarasa. 2004. La creciente ocupación antrópica del espacio inundable y el aumento de la vulnerabilidad en las poblaciones del bajo Arga (Navarra).

Cardoso. 2017. Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético. Caso de distritos bajo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina.



RESUMEN:

Durante los últimos años el territorio de la Comunidad Foral de Navarra se ha visto afectado en por bastantes episodios de inundaciones. En concreto en Pamplona por donde transcurre el cauce del río Arga, se ha visto expuesta a varias inundaciones, afectando a los terrenos próximos a dicho cauce.

Con el presente estudio se pretende abordar el problema de riesgo de inundación en el Municipio de Pamplona. Para poder evaluar este problema se ha estudiado la exposición y vulnerabilidad desde diferentes perspectivas y enfoques, para alcanzar resultados más sólidos en relación con el riesgo de inundación de la zona.

Se ha evaluado el riesgo de inundación de la zona a partir de la obtención del Daño Anual Esperado (DAE). Para el cálculo de dicho indicador se parte el concepto de riesgo, el cual está formado por tres componentes, amenaza, exposición y vulnerabilidad, también conocido como triángulo de riesgo.

Se define riesgo como la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas que se expresa como el producto del agente o amenaza, exposición y vulnerabilidad. En el caso particular de análisis, la amenaza está representada por las manchas de inundación proporcionadas por el Centro Nacional de información Geográfica (CNIG) asociadas a tres periodos de retorno, T10, T100 y T500.

Para la caracterización de la exposición, se ha analizado tanto la población como los activos residenciales. Se han desarrollado tres enfoques distintos, donde el primero de ellos discretiza la población o los activos de modo más general, como una densidad de población sobre la superficie del municipio. El segundo enfoque es más realista que el anterior, ya que en este caso el reparto de la población se realizar únicamente sobre la superficie edificada proporcionada por el catastro de Navarra. El último de los enfoques es el más detallista de los tres, dado que además de repartir la población o los activos sobre la zona edificada, tiene en cuenta la altura de dichos edificios, atribuyendo más población o más bienes a aquellos con mayor altura.

Por tanto, el enfoque 3 siempre proporcionará resultados más próximos a la realidad pues se ha utilizado una mayor cantidad de información. Se podrá comprobar cómo se ve afectado el resultado obtenido del análisis de riesgo en función del nivel de detalle con el que se discretice la exposición.

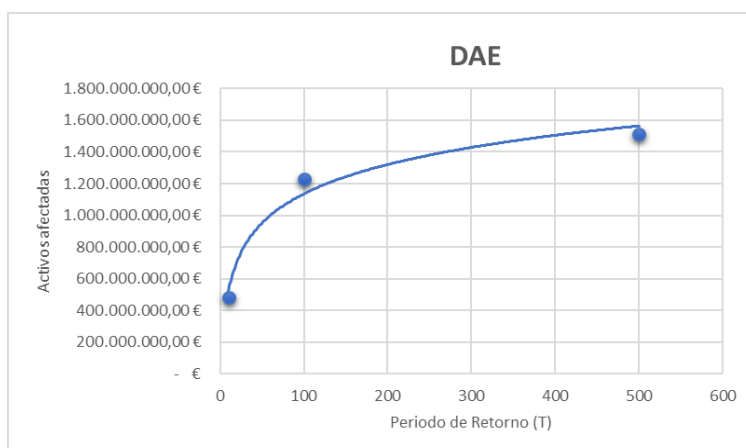
En lo correspondiente a la vulnerabilidad, se utilizaron funciones de daño para caracterizar cómo se verán perjudicados los elementos expuestos. En el caso de la población, dicha función describe que estará afectada toda aquella población que esté localizada en superficies donde la cota de inundación sea superior a 0.5m. Con respecto a los activos residenciales, la función asume un nivel de daño u otro en función de la cota de inundación. Para cotas superiores a 6m se considera que la edificación queda totalmente dañada.

El daño será un evento probabilístico por estar asociado a distintos periodos de retorno de inundación, y quedará definido como el producto de la altura inundación, por la exposición, por la función de daño:

$$\text{Daño}(T) = h(T) * \text{exposición} * f(T, h)$$



El resultado de este producto será el número que representará el daño generado correspondiente al activo analizado ya sea personas, edificación... asociado a un periodo de retorno determinado.



Con todo ello ya se puede proceder a definir el Daño Anual esperado. Este se define como el área bajo la curva representada, es decir, la suma de los productos de cada daño por la probabilidad de ocurrencia. Por tanto, se definirá como la integral de la función de probabilidad.

Con el DAE ya obtenido se ha analizado como se ha visto perjudicada tanto la población como los activos residenciales por causas de inundación. Las consecuencias reales que acarrearía un evento de inundación se encuentran entre los resultados obtenidos mediante el enfoque 1 y los obtenidos en el enfoque 2 y 3. Por tanto se podría tomar dichos resultados como una cota superior e inferior del daño que se estima realmente.

Posteriormente se ha analizado como se vería afectada la ciudad por efectos del cambio climático. Se ha simulado dicho cambio climático como un aumento de la cota de inundación con respecto a las manchas de inundación ya conocidas. Se han supuesto incrementos de cota de 0.25m, 0.5m, 1m y 2m. Dicho análisis se dividió en dos partes distintas, es decir, se ha sustituido el efecto del cambio climático por un cambio en el Daño Anual esperado (DAE) más un incremento potencial de la población y activos afectados, puesto que no se dispone de datos suficientes para poder generar la mancha de inundación real asociada a los incrementos de cota descritos anteriormente.

Se concluye que la cantidad de elementos afectados (población y activos residenciales) aumenta exponencialmente al aumentar la cota de inundación, y con ello la superficie inundada.

Para estudios posteriores se recomienda aumentar el número de periodos de retorno de análisis para poder proporcionar resultados más exactos. Por otro lado, se ha apreciado que dado el alto nivel de detalle de la mancha de inundación y del catastro, hay zonas edificadas que el ráster nunca llega a inundar, sino que rodea dichas edificaciones. Esto afecta en mayor medida enfoque 2 como al 3, ya que tanto la población como los activos están colocados sobre dichas superficies. Como una posible mejora a implementar sería intentar corregir la mancha, interpolando la cota de inundación en dichos huecos ya que realmente estos sí se verían afectados por las inundaciones.



DIFERENTES ENFOQUES EN LA CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA DE LA EXPOSICIÓN FRENTE A EVENTOS DE INUNDACIÓN FLUVIAL. APLICACIÓN AL CASO DE LA CIUDAD DE PAMPLONA Y ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO



TITLE:

Different approaches to the socio-economic characterization of exposure to river flood events. Application to the case of the city of Pamplona (Spain) and study of the effects of climate change.

AUTHOR:

Marta Fresán Sánchez de Muniáin

DIRECTORS:

Saúl Torres Ortega, Pedro Díaz Simal

CALL:

September 2018

KEYWORDS:

Exposure, vulnerability, population, residential assets, risk analysis, hazard, flood spot, return period, approach.

MAIN REFERENCES:

- Banco Mundial. 2013. Modelización probabilística para la gestión del riesgo de desastres. El caso de Bogotá, Colombia.
- COAG. 2004. Natural Disasters in Australia. Reforming Mitigation, Relief and Recovery Arrangements.
- Gobierno de España. 2016. Informe de seguimiento del plan de gestión del riesgo de inundación de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro.
- Perles Rosello. 2010. Apuntes para la evaluación de la vulnerabilidad social frente al riesgo de inundación.
- Bescós y Camarasa. 2004. La creciente ocupación antrópica del espacio inundable y el aumento de la vulnerabilidad en las poblaciones del bajo Arga (Navarra).
- Cardoso. 2017. Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético. Caso de distritos bajo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina.



SUMMARY:

During the last few years the Region of Navarre has been affected by several episodes of flooding. Specifically, in Pamplona, where the course of the Arga River runs, several floods have taken place, affecting buildings and population close to the river path.

The present study aims to cope with the problem of flood risk in Pamplona. In order to evaluate this problem, exposition and vulnerability have been studied from different perspectives, to achieve more accurate results concerning the flooding risk in the area.

The flooding risk in the area has been assessed obtaining the Expected Annual Damage (EAD). To calculate this indicator, we have started by defining the concept of risk, which could be formed by three components (also known as risk triangle): hazard, exposure and vulnerability.

The risk is defined as the probability of an event and its negative consequences and it is expressed as the product of the agent or hazard, exposure and vulnerability. In this particular case, the hazard is represented by extension and the depth of the flooding provided by the National Geographical Information Center (CNIG) for a given return period, T10, T100 and T500.

For the characterization of the exposure, both the population and residential assets have been analyzed. Three different approaches have been developed, where the first of them discretizes the population or the assets more generally, as a density of population on the surface of Pamplona. The second approach is more realistic than the previous one, due to the fact that in this case the distribution of the population was carried out on the built-up area provided by the Cadastre of Navarre. The last approach is the most detailed of all because it has also taken into account the high buildings, attributing more population or more goods to greater height.

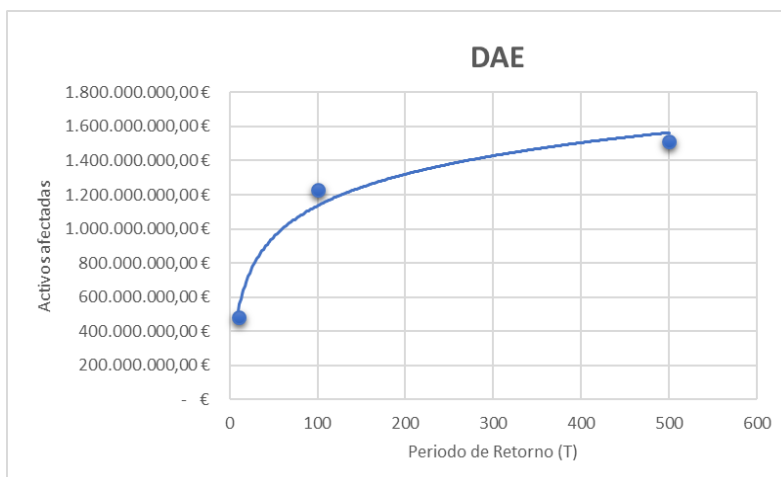
Therefore, approach 3 always offers results closer to reality because a greater amount of information has been used. It could be checked how the result of the risk analysis has been influenced according to the level of detail achieved in the discretization of the exposure.

Regarding the vulnerability, damage functions are used to characterize how the exposed elements will be damaged. For the analysis of the population, this function describes that any population located on surfaces where the flood level is greater than 0.5m will be affected. With respect to residential assets, the function has a level of damage depending on the flood depth. For water levels higher than 6 m, the building is considered totally damaged.

The damage is a probabilistic event because it is associated with several flood return periods, and it will be defined as the product of flood height, exposure and the damage function:

$$Damage(T) = h(T) * exposition * f(T, h)$$

The result of this product will represent the damage generated corresponding to the analyzed asset, population, buildings ... associated with a determined return period.



With all the background exposed above we can proceed to define the Expected Annual Damage. This is defined as the area under the curve represented, that is, the sum of the products of each damage by the probability of occurrence. Therefore, it will be defined as the integral of the probability function.

With the EAD already obtained, it has been analyzed how the population as well as the residential assets have been affected due to flood risk. The real consequences that a flood event would generate are between the results obtained through approach 1 and those obtained in approach 2 and 3. Therefore, these results could be taken as a higher and lower level of the damage that is actually estimated.

The following step in this study has been to analyze how the city would be affected by the effects of climate change. The climate change has been simulated as an increase of water depth with respect by extent and the depth of the flooding provided for a given return period. Elevation levels of 0.25m, 0.5m, 1m and 2m have been assumed. This analysis was divided into two distinct parts. The effect of climate change has been replaced by a change in the Expected Annual Damage (EAD) plus a potential increase in the population and assets affected, since there is not enough data available to be able to generate the actual flood spot associated with the elevation increments described above.

It is concluded that the quantity of affected elements (population and residential assets) increases exponentially as the level of flood increases, and so does the flooded area.

For further studies it is recommended to increase the number of return periods of analysis to be able to provide more accurate results. On the other hand, it has been appreciated that given the high level of detail of the flood spot and the cadastre, there are built-up areas that the raster never floods, but surrounds these buildings. This affects in a greater level, both approaches 2 and 3 since both the population and the assets are placed on that surfaces. A possible improvement to be implemented would be trying to correct the stain, interpolating the level of flood in those gaps since they would really be affected by the floods.



Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 7 |
| 1.1. | Planteamiento del problema | 7 |
| 1.2. | Objetivos | 7 |
| 1.3. | Metodología planteada | 8 |
| 2. | Metodología | 9 |
| 2.1. | Análisis de riesgo | 9 |
| 2.1.1. | Riego | 9 |
| 2.1.2. | Amenaza | 13 |
| 2.1.3. | Exposición | 14 |
| 2.1.4. | Vulnerabilidad | 16 |
| 2.2. | Daño anual esperado | 21 |
| 2.3. | Indicadores de riesgos | 23 |
| 2.4. | Metodología específica | 25 |
| 3. | Zona de estudio | 28 |
| 3.1. | Contextualización de la zona de estudio | 28 |
| 3.2. | Bases de datos | 30 |
| 3.2.1. | Población | 30 |
| 3.2.2. | Uso de suelos | 32 |
| 3.2.3. | Actividad económica | 33 |
| 3.2.4. | Stock per cápita | 33 |
| 4. | Aplicación al caso de estudio | 35 |
| 4.1. | Caracterización de la amenaza | 35 |
| 4.2. | Caracterización de la exposición | 39 |
| 4.2.1. | Población | 39 |
| 4.2.2. | Activos residenciales | 49 |
| 4.3. | Caracterización de la vulnerabilidad | 56 |
| 4.3.1. | Población | 56 |
| 4.3.2. | Activos residenciales | 58 |
| 5. | Resultados del análisis de riesgo | 63 |
| 5.1. | Riesgo sobre la población | 63 |
| 5.2. | Riesgo sobre los activos residenciales | 72 |



| | | |
|--------|--|-----|
| 6. | Evaluación frente a cambio climático | 81 |
| 6.1. | Obtención del DAE | 83 |
| 6.1.1. | Análisis de riesgo | 85 |
| 6.2. | Elementos potencialmente expuestos | 95 |
| 6.2.1. | Análisis de riesgo potencial..... | 100 |
| 6.3. | Síntesis de resultados..... | 103 |
| 7. | Conclusiones..... | 105 |
| 8. | Bibliografía | 107 |



Resumen de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Triángulo de riesgo | 10 |
| Figura 2. Inundaciones producidas por las crecidas del Arga | 13 |
| Figura 3. Representación de la función de daño asociado a cada periodo de retorno | 21 |
| Figura 4. Elementos considerados en el cálculo de indicadores de riesgo | 24 |
| Figura 5. Función de daño para pérdidas económicas totales por altura de agua | 26 |
| Figura 6. Función DAE asociada a los activos afectados | 26 |
| Figura 7. Mapa de la cuenca del rio Arga | 28 |
| Figura 8. Planta del Municipio de Pamplona | 29 |
| Figura 9. Mapa con los ríos en la zona de la cuenca de estudio | 29 |
| Figura 10. Evolución de la población en Pamplona 1996 - 2017 | 30 |
| Figura 11. Áreas afectadas por riesgo de inundación. | 31 |
| Figura 12. Índice de envejecimiento según el INE | 32 |
| Figura 13. Código para el procesamiento de la mancha de inundación | 37 |
| Figura 14. Código para el procesamiento de la mancha de inundación | 37 |
| Figura 15. Mapa de la mancha de inundación T=10 | 38 |
| Figura 16. Mapa de la mancha de inundación T=500 | 38 |
| Figura 17. Mapa de la mancha de inundación T=100 | 38 |
| Figura 18. Código para la obtención de la población según el enfoque 1 | 41 |
| Figura 19. Código para la obtención de la población según el enfoque 1 | 41 |
| Figura 20. Código para la obtención de la población según el enfoque 1 | 41 |
| Figura 21. Reparto de la población en Pamplona según el enfoque 1..... | 42 |
| Figura 22. Superficie de edificios proporcionada por el Catastro..... | 43 |
| Figura 23. Código para la obtención de la población según el enfoque 2 | 44 |
| Figura 24. Código para la obtención de la población según el enfoque 2 | 44 |
| Figura 25. Código para la obtención de la población según el enfoque 2 | 44 |
| Figura 26. Reparto de la población en la superficie edificada según el enfoque 2..... | 45 |
| Figura 27. Representación del enfoque 1 sobre el enfoque 2 | 46 |
| Figura 28. Código para la obtención de la población según el enfoque 3 | 47 |
| Figura 29. Código para la obtención de la población según el enfoque 3 | 48 |
| Figura 30. Código para la obtención de la población según el enfoque 3 | 48 |
| Figura 31. Mapa de representación de la población según el enfoque 3 | 49 |
| Figura 32. Código para la obtención de los activos residenciales según el enfoque 1 | 50 |
| Figura 33. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 1 | 51 |
| Figura 34. Mapa de reparto de los activos residenciales según el enfoque 1 | 51 |
| Figura 35. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 2 | 52 |
| Figura 36. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 2 | 52 |
| Figura 37. Mapa representación del reparto de los activos residenciales según el enfoque 2.. | 53 |



| | |
|---|-----|
| Figura 38. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 3 | 54 |
| Figura 39. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 3 | 54 |
| Figura 40. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 3 | 54 |
| Figura 41. Mapa de representación de los activos residenciales según del enfoque 3 | 55 |
| Figura 42. Función de daño para el análisis de la población | 57 |
| Figura 43. Código para el análisis de vulnerabilidad de la población | 57 |
| Figura 44. Mapa de población expuesta a riesgo de inundación | 58 |
| Figura 45. Función de daño asociada a los activos residenciales | 59 |
| Figura 46. Función de daño utilizada para el análisis de los activos residenciales | 60 |
| Figura 47. Código para el análisis de vulnerabilidad de los activos residenciales | 60 |
| Figura 48. Código para la obtención del daño en activos residenciales | 61 |
| Figura 49. Código para la obtención del daño en activos residenciales | 62 |
| Figura 50. Mapa de activos residenciales afectados | 62 |
| Figura 51. Ecuaciones para la obtención del DAE | 63 |
| Figura 52. DAE de personas afectadas en base al enfoque 1 | 64 |
| Figura 53. DAE de personas afectadas en base al enfoque 2 | 66 |
| Figura 54. DAE de población en base al enfoque 3 | 68 |
| Figura 55. Mapa resumen de las diferencias entre los diferentes enfoques | 69 |
| Figura 56. Representación del DAE en base al enfoque 1 | 73 |
| Figura 57. Representación del DAE en base al enfoque 2 | 75 |
| Figura 58. Representación del DAE en base al enfoque 2 | 77 |
| Figura 59. Oscilación de las precipitaciones máximas hasta 2075 | 81 |
| Figura 60. Código para la evaluación frente al cambio climático | 83 |
| Figura 61. Código para la evaluación frente al cambio climático | 84 |
| Figura 62. Código para la evaluación frente al cambio climático | 84 |
| Figura 63. Código para la evaluación frente al cambio climático | 85 |
| Figura 64. DAE para un aumento de la cota de inundación de 0.25m | 87 |
| Figura 65. DAE para un aumento en la cota de inundación superior a 0.5m | 87 |
| Figura 66. DAE asociado a los activos residenciales afectados | 91 |
| Figura 67. Diferencias entre el DAE numérico y el analítico | 93 |
| Figura 68. Ejemplo de perfil longitudinal de Pamplona | 96 |
| Figura 69. Proceso llevado a cabo para la obtención de resultados | 97 |
| Figura 70. Conversión de ráster a polígonos | 98 |
| Figura 71. Buffer ejecutado con respecto al polígono de partida | 98 |
| Figura 72. Diferencia entre el buffer y el polígono base | 99 |
| Figura 73. Población potencialmente afectada a causa del cambio climático | 99 |
| Figura 74. Población afectada previo al aumento de la cota de inundación | 101 |
| Figura 75. Población afectada tras aumentar la cota de inundación | 101 |
| Figura 76. Activos residenciales potencialmente afectados por el cambio climático. | 101 |



Resumen de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Indicadores de exposición física | 23 |
| Tabla 2. Indicadores de exposición económica..... | 23 |
| Tabla 3. Indicadores de exposición de población | 23 |
| Tabla 4. Indicadores de Amenaza | 24 |
| Tabla 5. Evolución de la población por barrios 2010 - 2015 | 31 |
| Tabla 6. Variación del VAB | 33 |
| Tabla 7. Desglose del Valor Catastral de Pamplona | 33 |
| Tabla 8. Capas del catastro de Navarra..... | 43 |
| Tabla 9. Tipos de alturas según el catastro | 47 |
| Tabla 10. Tabla de nivel de riesgo en función de la cota de inundación | 59 |
| Tabla 11. División de la curva de daño por tramos..... | 61 |
| Tabla 12. Personas afectadas por riesgo de inundación en base al enfoque 1 | 64 |
| Tabla 13. Resumen resultados del DAE..... | 65 |
| Tabla 14. Personas afectadas por riesgo de inundación en base al enfoque 2 | 65 |
| Tabla 15. Resumen resultados del DAE..... | 67 |
| Tabla 16. Personas afectadas por riesgo de inundación en base al enfoque 3 | 67 |
| Tabla 17. Resumen resultados del DAE..... | 68 |
| Tabla 18. Resumen de resultados obtenidos de análisis de vulnerabilidad | 69 |
| Tabla 19. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques..... | 70 |
| Tabla 20. Tabla comparación de resultados de DAE entre enfoques | 70 |
| Tabla 21. Resumen DAE según enfoques..... | 70 |
| Tabla 22. Resumen de resultados DAE obtenidos | 71 |
| Tabla 23. Ecuaciones para la obtención del DAE | 72 |
| Tabla 24. Activos afectados en base al enfoque 1 | 73 |
| Tabla 25. Resumen de resultados DAE en base al enfoque 1 | 74 |
| Tabla 26. Activos afectados en base al enfoque 2 | 75 |
| Tabla 27. Resumen de resultados DAE en base al enfoque 2. | 76 |
| Tabla 28. Activos afectados en base al enfoque 3 | 76 |
| Tabla 29- Resumen de resultados DAE en base al enfoque 3 | 78 |
| Tabla 30. Resumen de resultados obtenidos de análisis de vulnerabilidad | 78 |
| Tabla 31. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques..... | 79 |
| Tabla 32. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques..... | 79 |
| Tabla 33. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques..... | 79 |
| Tabla 34. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques..... | 79 |
| Tabla 35. Personas afectadas por aumento en la cota de inundación | 86 |
| Tabla 36. Resumen de resultados obtenidos | 89 |
| Tabla 37. Resumen de resultados | 89 |
| Tabla 38. Personas afectadas por aumento de la cota de inundación | 89 |
| Tabla 39. Activos residenciales afectados por aumento de la cota de inundación | 90 |
| Tabla 40. Factor de daño en función de la cota de inundación | 90 |
| Tabla 41. Resumen de DAE por efectos del cambio climático | 93 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 42. Resumen de daño debido al cambio climático..... | 94 |
| Tabla 43. Superficies potencialmente inundadas | 96 |
| Tabla 44. Población potencialmente afectada por un aumento de la cota de inundación | 100 |
| Tabla 45. Personas afectadas en zonas con mancha de inundación conocida | 103 |
| Tabla 46. Activos afectados en zonas con mancha de inundación conocida..... | 103 |
| Tabla 47. Personas potencialmente afectadas | 103 |
| Tabla 48. Activos potencialmente afectados | 103 |



1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Las inundaciones son la catástrofe natural que mayor daño genera en España. Según el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, los daños por inundaciones se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales.

Particularizando, durante los últimos años el territorio de la Comunidad Foral de Navarra se ha visto afectado en por bastantes episodios de inundaciones. En concreto Pamplona por donde transcurre el cauce del río Arga, se ha visto expuesta a varias inundaciones, afectando a los terrenos próximos a dicho cauce.

Esto ha generado la necesidad de realizar numerosos estudios para intentar abordar el problema de riesgo de inundación en la Comunidad Foral, en particular en la Ciudad de Pamplona, con el objetivo de garantizar al máximo la seguridad de las personas y los bienes, además de minimizar en la medida de lo posible las consecuencias negativas para el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a este tipo de riesgos naturales.

Esto genera la necesidad de analizar el riesgo de inundación de la zona, estudiando la exposición y vulnerabilidad de los activos presentes en el lugar, para en un futuro poder intentar mitigar las consecuencias de dichas catástrofes.

1.2. Objetivos

Con el presente estudio se pretende abordar el problema de riesgo de inundación en una zona determinada, en este caso, en el Municipio de Pamplona. Para poder evaluar este problema se estudiará la exposición y vulnerabilidad desde diferentes perspectivas y enfoques, de tal modo que se puedan alcanzar resultados más sólidos en relación con el riesgo de inundación de la zona.

Se pretende desarrollar instrumentos de trabajo que contribuyan a evaluar el riesgo de inundación mediante el uso de herramientas como ArcGis y RStudio.

Además, se quiere evaluar la variación de dos de las componentes que conforman el concepto de riesgo, es decir, la exposición y la vulnerabilidad, en función del nivel de detalle con el que se discreticen, pudiendo observar como varía el riesgo en función de estas.

También se tiene como objetivo estudiar el efecto del cambio climático sobre el Municipio de Pamplona, es decir, cómo un incremento de la cota de inundación ocasionado por dicho cambio climático afecta a la exposición y vulnerabilidad frente a inundación.

Es evidente como se podrá comprobar, que todo el análisis realizado podrá ser aplicado a cualquier otra zona urbana sobre la que se quiera realizar el estudio, siempre y cuando las características de la zona sean similares a las del presente proyecto.



1.3. Metodología planteada

Se ha evaluado el riesgo de inundación de la zona a partir de la obtención del Daño Anual Esperado (DAE). Para el cálculo de dicho indicador se parte el concepto de riesgo, el cual está formado por tres componentes, amenaza, exposición y vulnerabilidad, también conocido como triángulo de riesgo.

Son exactamente estas componentes las que se han evaluado más en profundidad, en concreto la exposición y la vulnerabilidad, para poder apreciar como varía dicho riesgo o daño en función del nivel de detalle con el que se estimen dichas variables.

Este procedimiento se ha realizado en la evaluación de riesgo sobre la población, así como para la evaluación de riesgo de los activos residenciales también vulnerables a estas circunstancias.

En la segunda parte del análisis, se plantea evaluar las potenciales consecuencias que generaría el cambio climático, traducidas como un aumento de la cota de inundación sobre las manchas ya producidas. Se ha evaluado el riesgo en base a las personas y activos potencialmente afectados, siendo estas las que se encuentran bajo dicha superficie generada.



2. Metodología

2.1. Análisis de riesgo

El número de eventos de inundación ha crecido considerablemente estos últimos años, particularmente en áreas urbanas, impactando de manera negativa el funcionamiento normal de los sectores social, de servicio, económico y financiero, entre otros, dejando en mayor vulnerabilidad a la población con menos recursos. Las inundaciones en la comarca de Pamplona y alrededores están comenzando a tomar gran importancia dado que cada año se producen inundaciones que afectan tanto social como económicamente a la población. En las últimas inundaciones que tuvieron lugar en abril de 2018, más de 70 municipios de todo Navarra se vieron afectados por la crecida de varios ríos pertenecientes a la cuenca del Ebro, Ega, Arga y Aragón.

La determinación del riesgo por inundación se ha convertido en una práctica cada vez más recurrente, debido principalmente a la planeación urbana y a la mitigación de desastres. Cuantificar el riesgo por inundación es una tarea compleja por las variables involucradas y su estado evolutivo.

2.1.1. Riesgo

El riesgo tiene múltiples definiciones, debido a las diferentes naturalezas de su aplicación, en el caso de este proyecto, se va a considerar riesgo de inundación.

La definición oficial de los términos para la evaluación de riesgo en desastres naturales se estableció en una convención nacional acordada por una reunión de expertos y organizada por la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre (UNDRO) en 1979. Esta definición es la siguiente:

“El término riesgo se refiere a las pérdidas esperadas a causa de una amenaza determinada en un elemento en riesgo, durante un período específico en el futuro.”

El riesgo a menudo se especifica en términos de un evento o circunstancia y las consecuencias que le siguen. El riesgo se mide en términos de la combinación de las consecuencias de un evento y su probabilidad.

La “probabilidad” describe que tan a menudo una amenaza puede ocurrir, y se refiere comúnmente como la probabilidad o frecuencia de un evento. Las “consecuencias” describen el efecto o impacto de una amenaza en la comunidad. Tanto la probabilidad como las consecuencias se pueden expresar usando palabras descriptivas o valores numéricos para comunicar la magnitud del impacto potencial (AS/NZS-4360,2004).

Según (EMA, 1998), la “frecuencia” es una medida de la probabilidad expresada como el número de ocurrencias de un evento en un tiempo dado. Y para (AS/NZS4360, 2004), la “probabilidad” es usada como una descripción general de la posibilidad de la frecuencia. Esta se puede expresar de forma cualitativa o cuantitativa. La definición de “evento”, según (AS/NZS-4360, 2004), se refiere a la ocurrencia de un grupo particular de circunstancias. El evento puede ser cierto o incierto. El evento puede ser de ocurrencia simple o de una serie de ocurrencias.

En un ámbito más general, el concepto de riesgo se basa en la combinación de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, configurando lo que se conoce como el triángulo del riesgo (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004), aplicado principalmente en la investigación de desastres naturales.

“The probability of harmful consequences or expected losses resulting from a given hazard to a given element at danger or peril, over a specified time period.”

“La probabilidad de pérdidas catastróficas o las pérdidas esperadas debido a los efectos sufridos como consecuencia de la actuación de un agente (amenaza) sobre una región en un periodo de tiempo determinado”.

En la literatura, para definir el riesgo es de gran utilidad y está ampliamente reconocido utilizar el triángulo de riesgo (risk), un desarrollo metodológico de gran utilidad donde el riesgo, es entendido como la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas que se expresa como el producto del agente o amenaza (hazard), exposición (exposure) y vulnerabilidad (vulnerability). Por lo tanto, si alguno de los factores aumenta, también lo hará el riesgo. El triángulo se muestra en la *Figura 1*:



Figura 1. Triángulo de riesgo

El nivel de peligrosidad de una inundación se puede expresar en términos de intensidad, asociados a la cota de inundación, o de probabilidad, asociados a periodos de retorno. En concreto, este estudio se ha basado en la obtención del nivel de riesgo a partir del estudio de las cotas de inundación, obtenida directamente del Centro Nacional de Información Geográfica.

Por todo ello se define el riesgo como:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza } (a, h) \times \text{Exposición } (a) \times \text{Vulnerabilidad}(a, h)$$

Para un mejor entendimiento, el subíndice "h" se refiere al tipo de peligro (determinado en su gravedad y su extensión temporal) y el subíndice 'a' es la región geográfica afectada por el peligro 'h'.

Particularizando, la exposición es la cantidad de personas ubicadas en el área 'a'. El riesgo resultante se refiere a las vidas potenciales perdidas con respecto al peligro 'h' en el área 'a'. La vulnerabilidad es la capacidad de las personas para hacer frente a la amenaza 'h' en el área 'a'.



El grado de vulnerabilidad de las personas que viven en el área afectada puede variar, la vulnerabilidad en la ecuación debe representar la vulnerabilidad promedio de un individuo individual dentro del área 'a'. El riesgo será igual a 0 si uno de los tres componentes de amenaza, exposición o vulnerabilidad es 0.

Será necesario, por tanto, definir más en detalle los factores que intervienen en el triángulo que se acaba de describir en la Figura 1. (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004).

La **amenaza** se define como todo evento, fenómeno físico o derivado de la actividad humana, que puede provocar daños en términos de pérdidas de vidas humanas, propiedad, pérdidas socioeconómicas y degradación ambiental, en el entorno costero. Pero, la estimación de riesgo puede depender de otras variables que tienen una determinada distribución de probabilidad y, por tanto, es necesario tener información de cada una de esas variables para poder cuantificar lo más precisamente posible la incertidumbre asociada a cada magnitud del evento considerado. Así, por ejemplo, se se desea estudiar el riesgo de inundación de una cuenca fluvial mediante la combinación de factores físicos y de ocupación de territorio con los datos específicos de inundación obtenidos.

Por otro lado, la **vulnerabilidad** es la capacidad que tienen las zonas, regiones, entidades o entes de anticiparse, enfrentarse, resistir, y recuperarse del impacto producido por un agente de una magnitud dada, entendiendo que la vulnerabilidad está constituida por múltiples factores institucionales, económico y socioculturales. Desde el punto de vista ingenieril, la vulnerabilidad es una función matemática definida según el grado de pérdida del elemento afectado, dependiendo de la intensidad del agente. Para propósitos socio-económicos más generales, la vulnerabilidad es el concepto definido de forma menos estricta, y en muchos casos basta con clasificar las unidades de estudio mediante una escala graduada entre “sin daños” y “daños totales”.

Por último, la **exposición** se utiliza para enlazar el agente con el riesgo de una zona concreta, y de esta manera incluir la información de la orografía de la comarca de Pamplona y la disposición de las actividades distribuidas a lo largo de la misma, y susceptibles de verse afectadas por un agente. Por tanto, la exposición, se define como la zona, región, entidad o ente que se ve afectado ante la ocurrencia de un evento asociado al agente.

El presente trabajo se tomará la amenaza o impacto como dato y se focalizará principalmente en analizar cómo evoluciona el riesgo en función del nivel de detalle que se desarrolle tanto en términos de vulnerabilidad como en términos de exposición.

Para la presente investigación el estudio del riesgo involucrará el daño físico directo correspondiente a población y viviendas. No se analizan los impactos correlativos o indirectos, ni los efectos inducidos o colaterales, es decir, se valorará el valor de las entidades, pero se dejará al margen el valor que estas generaría.



2.1.1.1. Riesgo de inundación

La Unión Europea define inundación como el cubrimiento temporal por agua de una tierra que normalmente no se encuentra cubierta, por lo que se incluyen las inundaciones producidas por ríos, torrentes, corrientes de agua efímeras mediterráneas e inundaciones marítimas en zonas costeras.

Para el estudio de este fenómeno, probabilidad de aparición, cuantificación de sus consecuencias..., se establece el concepto de riesgo. Éste se define como la combinación de una probabilidad de presentación de un determinado evento, llamado peligro, y las potenciales consecuencias adversas que tendría este evento para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural o las actividades económicas, que se denominan vulnerabilidad.

El análisis del riesgo de inundación consiste en determinar la naturaleza y extensión del riesgo existente mediante el análisis de las amenazas potenciales y evaluación de las condiciones de vulnerabilidad que pueden derivarse de la amenaza potencial, causando daños personales, a la propiedad y al medio ambiente.

Por tanto, el riesgo se define como el producto del peligro y la vulnerabilidad, asociadas en este caso a una inundación. En las últimas décadas, la noción de que el riesgo es la base de las decisiones de gestión de inundaciones ha sido ampliamente aceptada y operacionalizada a través del uso de modelos y análisis de riesgos cuantificados que proporcionan evidencia para la toma de decisiones informadas sobre riesgos. Son justamente el resultado de estos modelos la base desde la que se ha obtenido la mancha de inundación sobre la que se ha trabajado para obtener la vulnerabilidad y exposición del área de estudio.

El riesgo de inundación en una cuenca fluvial ocurre cuando las lluvias excesivas durante un período de tiempo prolongado hacen que un río exceda su capacidad. También puede ser causada por nieve derretida y atascos de hielo. El daño ocasionado por las inundaciones de un río puede estar muy extendido ya que el desbordamiento afecta a los ríos más pequeños río abajo, lo que a menudo hace que las presas y los diques rompan y aneguen las áreas cercanas.

El agua se desborda por las orillas de un río o arroyo. Este es el más común y puede ocurrir en cualquier canal de tamaño, desde pequeñas corrientes hasta grandes ríos, y es el fenómeno al que la ciudad de Pamplona está expuesta.

En algunos casos, estas intrusiones pueden ocurrir a gran velocidad, provocando con poca o ninguna notificación. Este tipo de inundaciones son muy peligrosas y destructivas, no solo por la fuerza del agua, sino también por los desechos vertiginosos que a menudo se arrastran en el flujo.

La severidad de una inundación fluvial está determinada por la cantidad de precipitación en un área, el tiempo que tarda la precipitación en acumularse, la saturación previa de los suelos locales y el terreno que rodea el sistema fluvial, todo ello condiciona el calado de la inundación a la que la población va a estar expuesta.

En áreas más planas, el agua de la inundación tiende a subir más lentamente y ser más superficial, y a menudo permanece durante días. En áreas montañosas o montañosas, las inundaciones pueden ocurrir minutos después de una fuerte lluvia.



Figura 2. Inundaciones producidas por las crecidas del Arga

2.1.2. Amenaza

A continuación, se describen diferentes definiciones de amenaza que aportan en el marco para el trabajo que se expone.

- i. Una fuente de daño potencial o una situación con potencial de causar pérdidas. Esta puede referirse también como condiciones potenciales o existentes que pueden causar daños a las personas, propiedades o el ambiente. (EMA, 1998)
- ii. Una situación física con el potencial para causar una consecuencia no deseada. (IUGS, 1997)
- iii. La amenaza puede ser entendida como la probabilidad de ocurrencia de un evento con una intensidad más grande o igual a “i” durante un periodo de exposición T (Oliveira, 2006).
- iv. Una condición latente derivada de la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antrópico no intencional, que puede causar daño a la población y sus bienes, la infraestructura, el ambiente y la economía pública y privada. Es un factor de riesgo externo. (DPAE, 2006)
- v. Probabilidad de que un evento o fenómeno potencialmente destructivo de determinada intensidad se verifique en un periodo de tiempo y en un área dada. Sinónimo de probabilidad de ocurrencia.
- vi. Probabilidad de que un peligro particular ocurra dentro de un periodo de tiempo dado.
- vii. Probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de producir daño en un intervalo de espacio y tiempo determinado.



A partir de estas definiciones de amenaza se pueden reconocer cinco elementos o características que deben ser identificadas:

- Evento: Elemento amenazante, en este caso un deslizamiento, este parámetro define el tipo de amenaza.
- Probabilidad de ocurrencia: Posibilidad de que se genere un deslizamiento, define la intensidad de la amenaza.
- Capacidad de producir daño: Efecto del evento sobre los elementos expuestos, este parámetro se define por la magnitud del elemento amenazante.
- Espacio: Define la distribución espacial de la amenaza.
- Tiempo: Define la distribución temporal de la amenaza.

Por otra parte, el término “peligro”, se entiende como un evento natural que puede conducir al daño, descrito en términos geométricos, mecánicos, o cualquier otra característica. Puede ser existente o potencial.

2.1.2.1. Amenaza de inundación

Las inundaciones son eventos caracterizados por el tránsito o acumulación de agua por fuera de los cauces de los ríos (lechos mayores) y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje naturales o construidas. Típicamente, se generan por la combinación de lluvias intensas, cambios en las condiciones del flujo en los ríos; otras veces, por las fallas en los sistemas o estructuras construidos para la regulación hidráulica, por procesos de urbanización inadecuados.

La amenaza de inundación en un área determinada puede representarse, en términos probabilistas, como un conjunto de eventos estocásticos, cada uno de los cuales genera una distribución particular de intensidades (frecuentemente definida por la profundidad de inundación) en el área de análisis. Este conjunto de eventos abarca todas las intensidades y distribuciones de eventos de inundación que pudiesen ocurrir y afectar la zona de análisis. También se puede representar mediante mapas de amenaza probabilistas cada uno de aquellos, asociado a un periodo de retorno determinado.

2.1.3. Exposición

Es evidente que la cantidad de desastres naturales, en este caso inundaciones ha ido en aumento en las últimas décadas pudiéndose deber principalmente a la degradación ambiental y la intervención humana en los ecosistemas naturales. Los deslizamientos de tierra o los regímenes de inundación asociados con la alteración ambiental inducida por el hombre y los nuevos riesgos relacionados con el cambio climático son ejemplos de tales riesgos socio-naturales.

Los elementos en riesgo pueden ser seres humanos, la infraestructura física, los servicios, vehículos, bienes individuales y comunales, el medio ambiente y la economía, la inclusión de estos elementos lleva a que el manejo del riesgo sea parte de las estrategias del desarrollo sostenible de una comunidad.



La exposición se refiere a los elementos que están sujetos al impacto de una amenaza específica. Los elementos principales en riesgo son la población, trabajos de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos e infraestructura, etc. expuestos a las fuentes del riesgo (EMA, 2004).

Por lo tanto, si la población y los recursos económicos no estuvieran ubicados en (expuestos) entornos potencialmente peligrosos, no existiría ningún problema de riesgo de desastres. Si bien la literatura y el uso común a menudo confunden erróneamente la exposición y la vulnerabilidad, son distintos. La exposición es un factor determinante del riesgo necesario pero no suficiente. Es posible estar expuesto pero no vulnerable (por ejemplo, viviendo en una llanura de inundación pero teniendo los medios suficientes para modificar la estructura y el comportamiento del edificio para mitigar la posible pérdida). Sin embargo, para ser vulnerable a un evento extremo, también es necesario estar expuesto.

El uso de la tierra y la planificación territorial son factores clave en la reducción del riesgo. El medio ambiente ofrece recursos para el desarrollo humano al mismo tiempo que representa la exposición a condiciones peligrosas intrínsecas y fluctuantes. La dinámica de la población, las diversas demandas de ubicación y la disminución gradual en la disponibilidad de tierras más seguras hacen que sea casi inevitable que los seres humanos se encuentren en lugares potencialmente peligrosos. Cuando la exposición a eventos es imposible de evitar, las decisiones de planificación y ubicación del uso de la tierra pueden ir acompañadas de otros métodos estructurales o no estructurales para prevenir o mitigar el riesgo.

Los elementos en riesgo pueden dividirse en tangibles, intangibles e institucionales. Algunos ejemplos de elementos tangibles son las personas, construcciones e infraestructura relacionada suministros de agua y energía. Ejemplos de elementos intangibles son las relaciones comunitarias, herencia, y las añoranzas personales. Elementos institucionales incluyen aspectos tales como la capacidad de compartir información y la efectividad de planes de gestión de emergencias.

2.1.3.1. Exposición de la población

La exposición humana hace referencia a la población que se encuentra en riesgo por efecto del daño físico que se puede presentar en las construcciones, al verse sometidas estas a un evento natural. De acuerdo con esto, la exposición humana se asocia a la ocupación máxima posible de las construcciones que hacen parte de la base de exposición, la cual se ha estimado como una distribución básica de la población en la superficie habitable.

Si se realizara un estudio más exhaustivo se podría estimar a través de factores como el uso y la clasificación socioeconómica de cada una de las construcciones. Cuando esta información no está disponible directamente, se puede inferir de fuentes como censos, información sectorial (salud, educación, por ejemplo), densidad poblacional e índices de ocupación por tipo de construcción como es el caso de este análisis.



2.1.3.2. Exposición de los activos

En las ciudades, la mayoría de los elementos expuestos pueden clasificarse dentro de un grupo amplio de edificaciones e infraestructura urbana y en subgrupos, según sus diferentes usos.

Con respecto a las construcciones, que conforman por lo general la mayor parte del valor económico expuesto en las ciudades, sus características pueden obtenerse a partir de diferentes fuentes, como las bases de información catastral o los censos de población y vivienda. Con base en esta información básica se caracteriza, en general, el tipo representativo de cada construcción y se asigna de esta manera la función de vulnerabilidad física de cada elemento o componente de un sistema (Banco Mundial, 2013).

Las ciudades disponen cada vez de mejor información en sus bases de datos de impuestos, registros de propiedad y censos de vivienda y población. Además, se puede obtener información complementaria a través de la interpretación de imágenes producidas por sensores remotos, como por ejemplo las fotografías aéreas o las imágenes de satélite.

Así como para las edificaciones, evaluar el impacto de un evento adverso sobre el resto de la infraestructura urbana y nacional requiere información detallada sobre su localización, identificación, características y vulnerabilidad.

Dada la variedad y complejidad de los sistemas de infraestructura, la clasificación, caracterización y evaluación de estos componentes puede ser en extremo difícil. En algunos casos se requiere modelar en detalle cada componente particular, para entender así su comportamiento ante un evento adverso. Sin embargo, con frecuencia es necesario hacer estimaciones aproximadas acerca de las características de cada componente, basadas en información disponible, observación directa y correlaciones con información sobre la población e índices socioeconómicos, con el fin de valorar su exposición y vulnerabilidad.

En este análisis únicamente se tendrán en cuenta la exposición de los edificios residenciales, dejando a un lado el análisis de la exposición del resto de infraestructuras.

2.1.4. Vulnerabilidad

Igual que para riesgo y amenaza, existen numerosas definiciones para vulnerabilidad. Las definiciones de vulnerabilidad dependen del interés del investigador y de su perfil profesional.

La vulnerabilidad, en términos generales, puede clasificarse desde el punto de vista técnico en vulnerabilidad física y en vulnerabilidad social. La primera se relaciona directamente con elementos físicos y funcionales, como por ejemplo, en pérdidas potenciales referidas a los daños o la interrupción de los servicios, a diferencia de la segunda que prácticamente sólo puede valorarse cualitativamente y en forma relativa, debido a que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, ideológicos, entre otros.

A continuación, se presentan algunos modos de definir la vulnerabilidad en relación al tema de estudio. Vulnerabilidad es el grado de susceptibilidad y resiliencia de la comunidad y el ambiente ante las amenazas. (COAG, 2004)



Las características de una persona o grupo en términos de su capacidad de anticiparse, afrontar, resistir, y recuperarse del impacto de una amenaza natural. Ésta involucra una combinación de factores que determinan el grado al cual la vida y el sustento de alguien se ponen en riesgo por un evento discreto e identificable en la naturaleza o en la sociedad (Blaikie, 1994)

Por otro lado, Bohle propone un marco conceptual para el análisis de la vulnerabilidad, y considera que puede estar compuesta por un lado interno y otro externo. El lado interno incluye la capacidad de soportar en términos de la capacidad de anticiparse, de resistir, y de recuperarse del impacto de una amenaza. El lado externo se refiere a la exposición. La exposición también se refiere a las características sociales e institucionales, a los procesos que reducen la capacidad de defensa tal como la exclusión de un tejido social. (Bohle, 2001)

La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en un área afectada por una amenaza. Este se expresa en una escala de 0 (no hay pérdida) a 1 (pérdida total). Es un grupo de condiciones y procesos resultantes de factores físicos, sociales, económicos y ambientales, los cuales incrementan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de las amenazas (Hungry, 2005).

Una variación aplicable de la anterior definición habla de la vulnerabilidad como el grado de pérdida producida en un cierto elemento o grupo de elementos expuestos a riesgo, resultante de la verificación de un fenómeno natural y de una intensidad dada. Es una función de la intensidad del fenómeno y de la tipología del elemento en riesgo.

La vulnerabilidad definida como el nivel de daño potencial es la probabilidad de que se presente cierto nivel de daño, lo cual se obtiene a partir de curvas de fragilidad o de daño, las cuales relacionan la magnitud de la amenaza con el nivel de daño esperado para un determinado elemento expuesto. Este nivel de daño estará asociado con el tipo de sollicitación (carga) que el movimiento transmite al elemento expuesto. En este sentido la CEPAL-BID (2000) define la vulnerabilidad como la probabilidad de que una comunidad, expuesta a una amenaza natural, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político-institucional y otros), pueda sufrir daños humanos y materiales.

Es necesario anotar que la vulnerabilidad en sí misma constituye un sistema dinámico, es decir, que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características (internas y externas) que convergen en una comunidad particular. El resultado de esa interacción es la incapacidad de la comunidad para responder adecuadamente ante la presencia de un riesgo determinado, con el consecuente "desastre". A esta interacción de factores y características se le puede denominar "vulnerabilidad global". La vulnerabilidad global se puede dividir en distintas vulnerabilidades siendo cada una de ellas un modo particular de analizar el fenómeno global, y que las diversas vulnerabilidades están estrechamente interconectadas entre sí. Difícilmente podríamos entender, por ejemplo, la vulnerabilidad física, sin considerarla una función de la vulnerabilidad económica y de la política, o esta última sin tener en cuenta la vulnerabilidad social, la cultural y nuevamente la económica (Wilches-Chaux, 1988). Todo ello se desarrolla más en detalle a posteriori.



Un desastre debe ser visto como la compleja interrelación entre eventos físicos potencialmente dañinos y la vulnerabilidad de la sociedad, su infraestructura, economía y medio ambiente, la cual está determinada por el comportamiento del ser humano. De aquí que se definan diferentes vulnerabilidades; física, social, económica, ambiental y otras.

Por tanto, define vulnerabilidad como uno de los componentes del riesgo ante desastres, y se consideran sus dimensiones física, social, económica y ambiental.

2.1.4.1. Vulnerabilidad de la inundación

Grado (nivel) de rendimiento de un sistema (estructura de ingeniería, red, grupo social, etc.) sobre un cierto nivel de inundación. Un sistema más vulnerable es aquel, que para una acción dada, no puede responder tan bien como otro. (Oliveira, 2006)

Un requerimiento fundamental para valorar la vulnerabilidad frente a inundación de un sistema es la habilidad de cuantificar el potencial para constituir daño como una función del nivel de amenaza de inundación. En general la vulnerabilidad expresa el comportamiento de un elemento en riesgo sujeto a un fenómeno con intensidad variable. Esta se da en términos de una relación de vulnerabilidad, referida como una relación general determinística, estadística o probabilística involucrando el estado de daño del componente, funcionalidad, pérdidas económicas, etc., a una medida apropiada de nivel de inundación.

El análisis y evaluación de vulnerabilidad se basa usualmente en daños de inundaciones anteriores (vulnerabilidad observada), y en un menor grado en investigaciones analíticas (predicción de vulnerabilidad).

Las funciones de vulnerabilidad de un elemento en riesgo representan la probabilidad de que las consecuencias de la inundación superen los límites de estabilidad del sistema basado en consideraciones físicas y socio-económicas. Las vulnerabilidades de vidas, estructuras, sistemas, y estructura socioeconómica, son los principales factores en el riesgo de inundación y pérdidas en áreas urbanas.

2.1.4.2. Vulnerabilidad Física

Se refiere al nivel de daño directo que puede sufrir un elemento expuesto en términos de su exposición y resistencia contra la magnitud de la amenaza.

Los análisis de riesgo que se presentan se enfocan principalmente en la “vulnerabilidad biofísica la cual es experimentada por los elementos en riesgo como el resultado del encuentro con la amenaza” (Adger, 2004). Modelos de vulnerabilidad biofísica intentan determinar el impacto de la amenaza sobre los elementos en riesgo, tales como personas, construcciones, infraestructura y la economía.

En términos de vulnerabilidad física y riesgo de construcciones, la vulnerabilidad es la predisposición intrínseca de un elemento expuesto a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida como resultado de la ocurrencia de un evento con intensidad determinada.



La vulnerabilidad física se conoce también como la dimensión física en la cual se manifiesta la vulnerabilidad y está relacionada con la ubicación y resistencia de los elementos expuestos.

2.1.4.3. Vulnerabilidad Social

La vulnerabilidad social considera una persona y/o las características inherentes de una sociedad, tales como el fondo económico y político. La vulnerabilidad social puede ser vista independientemente de la amenaza, porque esta se refiere a las características de los individuos los cuales son conformados por los procesos a su alrededor. Por ejemplo, la pérdida de una casa en un incendio no afecta todos los individuos en la misma manera. Esto es porque sus situaciones son diferentes, y sus características para soportar redes tales como la familia, los amigos y la comunidad, son diferentes. La habilidad de los individuos a recuperarse financieramente de los desastres también varía enormemente.

Una definición de vulnerabilidad enfocada hacia la vulnerabilidad social es “la dimensión humana del desastre. Para entender que hace la gente vulnerable, tenemos que movernos lejos de la amenaza en si misma y mirar de forma más amplia, y mucho más diversa el grupo de influencias: el rango completo de factores económicos, sociales, culturales, institucionales, políticos e inclusive psicológicos que forman la vida de las personas y crear el ambiente en el que ellos viven”. (Twigg, 2001)

A nivel social la vulnerabilidad es el grado en que un sistema o parte del sistema pueden reaccionar adversamente ante la materialización de la amenaza. La respuesta está condicionada por la resiliencia del sistema, que a su vez se puede definir como la capacidad del sistema de absorber y recuperarse después de ocurrido el evento.

Existen algunas características que deben ser descritas para definir la vulnerabilidad social:

- Bienestar inicial, estado nutricional, salud física y mental
- Supervivencia y resiliencia, objetos, capitales, ingresos y formación.
- Auto protección, capacidad y destreza para construir una casa segura, uso de un sitio seguro.
- Protección social, preparación y medidas de protección
- Redes sociales y políticas e instituciones, capital social, ambiente institucional.

La vulnerabilidad social se conoce también como la dimensión social en la cual se manifiesta la vulnerabilidad y se refiere al grado organizativo de la población, grado de educación, y conocimiento además de socialización sobre las causas e impactos de los desastres, nivel de autonomía para la toma de decisiones regional y localmente, grado de preparación de las instituciones.



2.1.4.4. Vulnerabilidad económica

La vulnerabilidad económica se conoce también como la dimensión económica en la cual se manifiesta la vulnerabilidad, y se relaciona con la situación económica de la población y sus gentes (ingresos, salud, educación, servicios básicos, etc)

Está estudiado y analizado que presentan cuadros que prueban la existencia de una relación inversamente proporcional entre la mortalidad y el ingreso de cada país en casos de desastre. Es decir que, en los países con mayor ingreso real per cápita, el número de víctimas que dejan los desastres es mucho menor que en los países con un bajo ingreso por habitante. Lo mismo puede afirmarse frente al ingreso por sectores socio - económicos al interior de los países. (Timberlake y Wijkman, 1985),

A nivel local e individual, la vulnerabilidad económica se expresa en desempleo, insuficiencia de ingresos, inestabilidad laboral, dificultad o imposibilidad total de acceso a los servicios formales de educación, de recreación y de salud, inexistencia de control local sobre los medios de producción, etc.

A nivel del país, la vulnerabilidad económica se expresa en una excesiva dependencia de nuestra economía de factores externos prácticamente incontrolables por nosotros, como son los precios de compra de las materias primas, y los precios de venta de combustibles, insumos y productos manufacturados, las restricciones al comercio internacional de nuestros productos y la imposición de políticas monetarias que garantizan más el cumplimiento al servicio de la deuda externa que el verdadero desarrollo y la autonomía del país.

2.2. Daño anual esperado

El daño anual esperado (DAE) de cualquier año dado es la integración de la curva de densidad de riesgo de inundación sobre todas las probabilidades. Denotado por $D(p)$ el daño que ocurre en el evento con la probabilidad p (el inverso del período de retorno) en la cuenca con el área A (Anders Skovgård Olsen, 2014). El DAE puede expresarse entonces como:

$$DAE = \iint D(p) dp dA$$

La integral se resuelve en un intervalo desde el período de retorno de $T_{D(p)} = 0$ (donde no ocurre daño en este evento y con una probabilidad de $p_{D(p)} = 0$) a un evento infinitamente grande ($p = 0$). En muchos casos, $T_{D(p)} = 0$ representa el nivel real de servicio de un sistema de drenaje existente, es decir, el período de retorno donde el daño comienza a ocurrir en la cuenca. Por supuesto, no es posible simular el costo de daño para todos los eventos entre $T_{D(p)} = 0$ y $T = \infty$. Por lo tanto, se debe hacer una aproximación para calcular el DAE.

El DAE por tanto se obtendrá de una curva similar a la que se muestra en la figura 3, la cual se trata de una curva de daño debido a amenaza de inundación en el municipio de Pamplona.

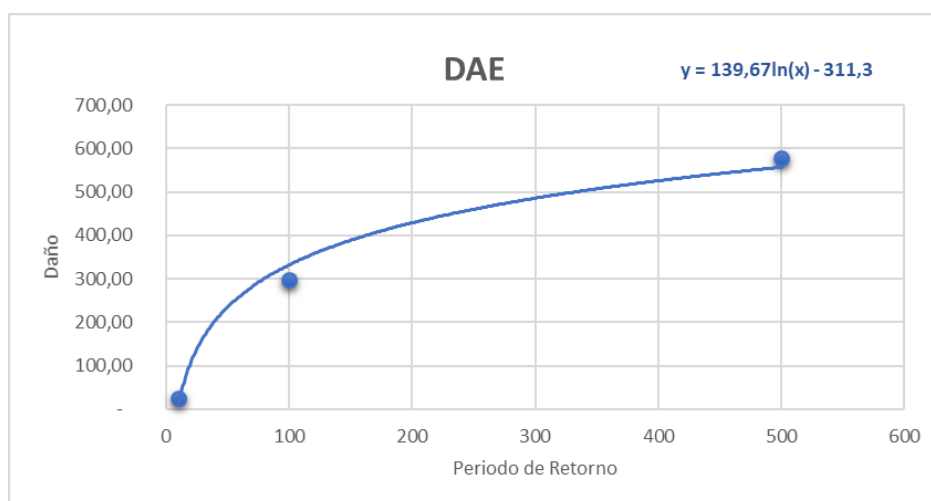


Figura 3. Representación de la función de daño asociado a cada periodo de retorno

Es adecuado el uso de una relación log-lineal entre el período de retorno y los costos de daños que permiten realizar muy pocas simulaciones de los riesgos y los costos correspondientes, con base en el análisis de acuerdo con Arnbjerg, Nielsen y Fleischer. El uso de un modelo logarítmico-lineal para representar las series excedencia se utiliza con frecuencia en hidrología, y por lo tanto, tal aproximación parece razonable.

Hay otras maneras de calcular el DAE es resolver la integral en la ecuación anteriormente mencionada. Se describen a continuación dos métodos de cálculo del DAE una integración numérica de todos los períodos probables de retorno y una solución analítica.



1. Estimación de DAE mediante integración numérica

Como se mencionó anteriormente, el DAE puede calcularse integrando el daño de inundación sobre todas las probabilidades. Esto se hace calculando el costo de n periodos de retorno. Existen varios métodos diferentes para la integración numérica; En este caso se utilizará la regla trapezoidal, la cual tiene la siguiente forma (donde n es escogido para que todos los periodos de retorno relevantes estén cubiertos):

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1})$$

2. Solución analítica para la estimación de DAE

También es posible evaluar el DAE a través de la integración analítica. Suponiendo que el costo de daño para un período de retorno T se puede expresar como: $D(T) = A + B * \ln(t)$. Así pues, DAE puede calcularse analíticamente como:

$$DAE = \int_0^{\exp(\frac{a}{b})} (a - b * \ln(p)) dp = [p(a - b * \ln(p) + b)]_0^{\exp(\frac{a}{b})} = b * \exp(\frac{a}{b})$$

La integración se realiza desde una probabilidad de 0 ($T = \infty$) hasta el punto donde la función log-lineal se cruza con el eje x lo que implica que el caso con el daño de inundación ya no ocurre.

En principio, los dos métodos deberían arrojar resultados similares bajo el supuesto de que la relación log-lineal postulada es razonable. Sin embargo, la cantidad de cálculos de riesgo requeridos difiere sustancialmente. Por lo tanto, la hipótesis principal que se probará es que la relación log-lineal es razonable.



2.3. Indicadores de riesgos

Es necesario ser capaz de medir todas las componentes que constituyen el riesgo, para lo cual se hace uso de indicadores. Los indicadores pueden ser de muchos tipos y muy diversos, cada uno de los cuales miden las características del evento en base a unos factores determinados (Banco Mundial, 2013).

Primeramente, los indicadores utilizados para el análisis de la exposición física se pueden obtener a partir de la información de bases de datos catastrales, de la información de los censos de población y vivienda, o mediante levantamiento directo de información en campo o con encuestas. Algunos de los indicadores principales de exposición física para edificaciones se describen en la tabla 1.

| Indicadores de exposición física |
|--|
| Fecha aproximada de construcción |
| Altura máxima de la edificación en número de plantas |
| Uso predominante de la edificación |
| Tamaño de la explanada en m ² |
| Área total de la construcción en m ² |
| Calidad de la construcción |

Tabla 1. Indicadores de exposición física

Otro grupo de indicadores corresponde con los de la exposición económica. La información está normalmente disponible en las bases de datos catastrales o se puede estimar utilizando avalúos y precios comerciales de las diferentes zonas y tipos constructivos de la ciudad. Algunos indicadores de exposición económica podrían ser los que se muestran en la tabla siguiente:

| Indicadores de exposición económica |
|--|
| Valor comercial por unidad de área de terreno |
| Valor comercial por unidad de área de construcción |
| Nivel socioeconómico |

Tabla 2. Indicadores de exposición económica

Los indicadores de exposición de la población se basan en la información derivada de las cifras oficiales de la población y su distribución geográfica en la ciudad. La fuente de información principal es normalmente el último censo de población y de vivienda. Se definen a continuación algunos indicadores:

| Indicadores de exposición de población |
|--|
| Densidad de ocupación máxima en personas por m ² de construcción |
| Densidad de ocupación máxima en personas por m ² de área de terreno |

Tabla 3. Indicadores de exposición de población

Los indicadores de amenaza hacen referencia al nivel de intensidad esperada, para un periodo de retorno específico. Así pues, en el caso de análisis de amenaza de inundación, se fundamenta principalmente en las **manchas de inundación** obtenidas de las bases de datos

geográficas proporcionadas por cada país o comunidad. En base a estos mapas es posible asignar un indicador de la amenaza, para diferentes unidades de la ciudad, con una escala de valores desde 0 (para la amenaza baja) hasta 1 (para amenaza alta). Indicadores generales de amenaza se describen en la tabla 1:

| Indicadores de amenaza |
|---------------------------|
| Superficie Inundada |
| Profundidad de inundación |
| Tiempo de concentración |
| Tiempo de inundación |
| Velocidad del flujo |

Tabla 4. Indicadores de Amenaza

El indicador del riesgo más representativo es el **daño anual esperado**. Esta métrica se utiliza como un indicador básico del nivel de riesgo al que está sometida la construcción.

También es posible formular indicadores de riesgo con un enfoque más integral, que reflejen no solamente el riesgo físico sino otros aspectos relativos a la susceptibilidad y exposición, la fragilidad social y la falta de resiliencia, manteniendo un marco conceptual subyacente en su formulación. Un indicador de este tipo es el **Índice del Riesgo Total** (R_t), que se determina con base en el riesgo físico y en un factor de impacto. Este factor de impacto incluye un coeficiente de agravamiento para cada unidad espacial de análisis basado en variables asociadas con la fragilidad social y la falta de resiliencia en cada unidad. La figura 4 presenta un esquema con diferentes elementos considerados en el cálculo de este tipo de indicador compuesto para cada unidad de análisis en el ámbito urbano. De la misma manera los pesos de cada subindicador o variable considerada se pueden obtener de procesos de valoración participativa utilizando técnicas como la del proceso analítico jerárquico como el método Delphi (Banco Mundial, 2013).

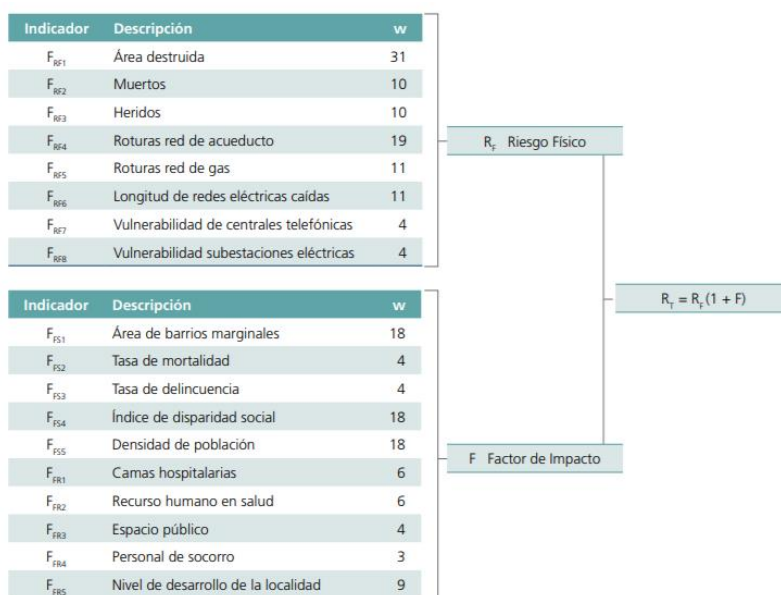


Figura 4. Elementos considerados en el cálculo de indicadores de riesgo



2.4. Metodología específica

En base a todo lo mencionado se ha desarrollado una metodología específica para este proyecto. El análisis del riesgo de inundación se puede realizar desde dos perspectivas diferentes. La primera de ellas a partir de la mancha de inundación asociada a cada periodo de retorno. En tal caso, el riesgo se mediría como la cantidad de superficie inundada por cada evento. Con ello, una variación en la superficie inundada para un determinado periodo de retorno supondría una variación en el riesgo.

El segundo de los modos para analizar el riesgo de inundación de una determinada zona, y el que se ha utilizado en este análisis, es a partir de la obtención del Daño Anual Esperado (DAE). Para la obtención del DAE se parte de una serie de eventos de inundación diferentes, y los traduce a una distribución uniforme, es decir, la inundación que se tendría todos los años en una misma zona si siempre se tuviera el mismo evento de inundación. Se transforma, una serie no constante (la realidad) en algo uniforme. La variación en el riesgo vendrá determinada por la variación en el Daño Anual Esperado.

Para el cálculo del el Daño Anual Esperado, se parte del concepto de riesgo o daño, el cual se define como la combinación de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, configurando lo que se conoce como el triángulo del riesgo. Se expresará por tanto como producto del agente o amenaza (impacto), exposición y vulnerabilidad.

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

El primer componente, la amenaza, se trata de forma probabilística, en este caso de estudio se referirá a diferentes periodos de inundación. Se ha tomado por tanto como amenaza manchas de inundación correspondientes a diferentes periodos de retorno.

En cuanto a la exposición se refiere a todo aquello que se encuentra en el terreno y que podrá verse o no afectado por la inundación. Se referirá en particular a las viviendas y a la población, los activos. En este caso concreto, en función del enfoque que se haya escogido los indicadores sobre los que se ha basado el análisis han sido unos u otros, desde densidad de población por m² de superficie hasta altura máxima de edificación tomada como número de plantas.

Por último, la vulnerabilidad hace referencia a cómo todos estos activos se ven dañados frente a dicha inundación, es la función que relaciona la amenaza con la exposición. A dichas funciones se las conoce como Funciones de Daño, las cuales relacionan daño con altura de inundación. Se utilizarán distintas funciones de daño en función del factor que se esté analizando.

Un ejemplo de este tipo de funciones de daño lo encontramos en la figura 5, donde aumentan los daños causados por las inundaciones a medida que aumenta el calado del agua de inundación. Como se puede apreciar en la figura siguiente, cuando el agua alcanza 1 m de altura se acumulan 80 % de los daños pudiendo causar graves daños estructurales (Banco Mundial, 2013).



Figura 5. Función de daño para pérdidas económicas totales por altura de agua

El daño por tanto será un evento probabilístico, ya que está asociado a distintos periodos de retorno de inundación, y quedará definido como el producto de la altura de ola, por la exposición, por la función de daño:

$$\text{Daño } (T) = h(T) * \text{exposición} * f(T, h)$$

El resultado de este producto será el número que representará el daño generado correspondiente al activo analizado ya sea personas, edificación... Por tanto, se podrá obtener para distintos periodos de retorno, el daño que se producirá.

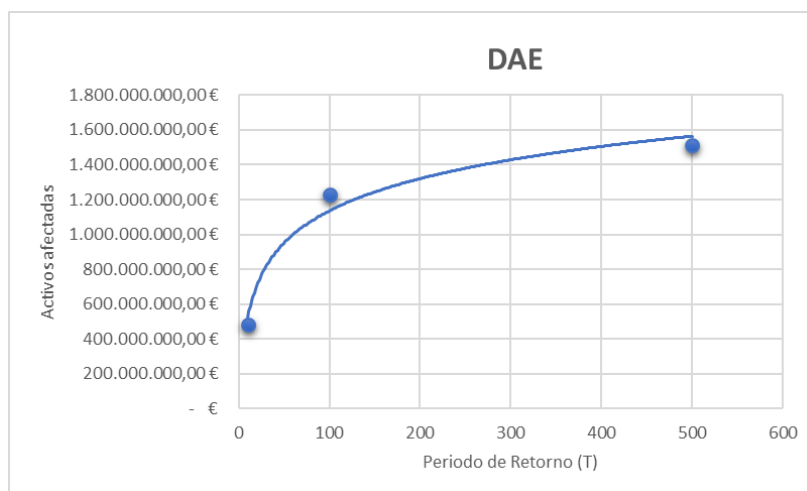


Figura 6. Función DAE asociada a los activos afectados

Con todo ello ya se puede proceder a definir el Daño Anual esperado. Este se define como el área bajo la curva anteriormente representada, es decir, la suma de los productos de cada daño por la probabilidad de ocurrencia. Por tanto, se definirá como la integral de la función de probabilidad.

$$DAE = \iint D(P) dp dA$$

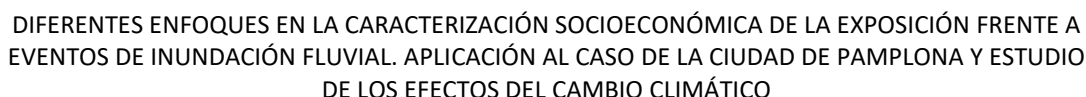


En este caso de estudio particular se dispone de tres eventos discretos, desde los que se obtienen tres puntos en el gráfico que relaciona activos afectados con periodo de retorno asociado. A partir de dichos puntos se obtiene la línea a partir de la cual se integra para obtener el DAE.

Por tanto, ya se podrá medir el riesgo de inundación de un evento concreto a partir del Daño Anual Esperado.

Para la evaluación de datos de exposición, se obtendrán según diferentes enfoques, que diferirán entre unos y otros en el nivel de detalle de los mismo, obteniendo así para cada enfoque un valor de Daño Anual Esperado asociado.

Posteriormente se ha analizado como se vería afectada la ciudad por efectos del cambio climático. Se ha simulado dicho cambio climático como un aumento de la cota de inundación con respecto a las manchas de inundación ya conocidas. Se han supuesto incrementos de cota de 0.25m, 0.5m, 1m y 2m. Dicho análisis se ha dividido en dos partes distintas, es decir, dicho efecto del cambio climático se ha sustituido por un cambio en el Daño Anual Esperado (DAE) más un incremento potencial de la población y activos afectados, puesto que no se dispone de datos suficientes para poder generar la mancha de inundación real asociada a los incrementos de cota descritos anteriormente.



La Comunidad Foral de Navarra es una región del norte de España con una superficie aproximada de 10.391 Km² (El 2,2 % de España) y una población de 636.142 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2017).

El Arga es uno de los principales afluentes del río Aragón, que, a su vez y pocos kilómetros hacia el sur, desemboca en el río Ebro. Su cuenca incluye territorios muy diferenciados que van desde las montañas en el norte, a las extensas llanuras en el sur de la comunidad.

El río Arga nace en los montes de Quinto Real, en la vertiente meridional del collado de Urquiaga, al norte de Navarra (España). Poco después toma dirección sur, siendo sus aguas represadas en el embalse de Eugui, que con una capacidad de 21 Hm³ constituye el principal reservorio de agua potable para la Mancomunidad de Aguas de la Comarca de Pamplona. Una vez atravesado éste, continúa su curso por el Valle de Esteribar hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, en donde recibe al río Ulzama en el municipio de Huarte, afluente de gran importancia que duplica el caudal del Arga (González Moreno, 2011).

En Huarte, el río Arga presenta un caudal medio anual de 7,18 m³/seg. y justo a la entrada de la cuenca recibe al citado río Ulzama, que procede de los montes de Ulzama-Velate y que con su caudal medio anual de 8,48 m³/seg. hace que se duplique el caudal original del río Arga.



Figura 8. Planta del Municipio de Pamplona

Ambos ríos, hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, se caracterizan por ser ríos de montaña, con pendientes acusadas que discurren por valles estrechos. Al entrar en la cuenca, el río Arga adquiere un recorrido meandriforme, recibiendo sucesivamente a sus afluentes como el Elorz, el Juslapeña y sobre todo el Araquil, para seguir aguas abajo hacia el Ebro, recorriendo 145 kilómetros sobre una cuenca de 2.759 km² de los que 2.652 pertenecen a la Comunidad Foral de Navarra, desembocando finalmente en el río Aragón.

En Pamplona la vega presenta una anchura de 500 a 1500 metros y su régimen hidrológico, manifiesta crecidas espectaculares, que pueden afectar a una amplia extensión de terreno. Como consecuencia de todas estas características, el Arga debería considerarse como un río de gran dinamismo, con fenómenos de erosión en la cara externa de los meandros y ripas, sedimentación y formación de depósitos en la cara interna de los mismos, así como tendencia natural a cambiar el trazado en la llanura aluvial.

Este dinamismo natural se encuentra muy alterado y casi totalmente eliminado por la presencia de numerosas infraestructuras, construcciones (Edificaciones, presas, defensas, puentes, etc.) y aprovechamientos (Huertas, clubes deportivos, equipamientos, etc.), por lo que se puede considerar que su curso está fijado.



Figura 9. Mapa con los ríos en la zona de la cuenca de estudio



3.2. Bases de datos

El objeto de este capítulo es describir las bases de datos y la metodología empleadas para identificar el tejido socioeconómico afectado por las inundaciones debidas al río Arga en la ciudad de Pamplona. A tal efecto, se ha procedido a recabar la información disponible en las distintas fuentes estadísticas existentes lo cual se presenta en apartados posteriores. Asimismo, y dado que se va evaluar el daño ocasionado por fenómenos de inundación en dichas zonas, se ha considerado necesario describir las características del tejido socioeconómico eventualmente afectado en el futuro, proyectando aquellas variables cuya evolución puede predecirse con cierta objetividad.

Para llevar a cabo la caracterización del tejido socioeconómico presente y futuro en Pamplona, se han utilizado diversas fuentes de información de población y de indicadores económicos como son el Valor Añadido Bruto (VAB), la Renta Disponible (RD) per cápita o el Stock de capital, entre otras.

3.2.1. Población

El análisis de la distribución de la población se ha basado en los datos censales elaborados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) para la Comunidad Foral de Navarra. Dichos datos están disponibles en la página web Instituto Navarro de estadística, así como en la web del Ayuntamiento de Pamplona y contemplan:

- Evolución de población según edad y diferenciando ambos sexos (Ciudad de Pamplona).
- Densidad de población y tasa de crecimiento de la población.
- Evolución de la población por barrios y diferenciando ambos sexos.

En base a estos datos y como análisis preliminar, se puede concluir lo siguiente:

1. La población de Pamplona está aumentando progresivamente y de forma constante desde los últimos 20 años como se aprecia en la gráfica. En ella se muestra la evolución de la población desde de 1996 hasta 2017.

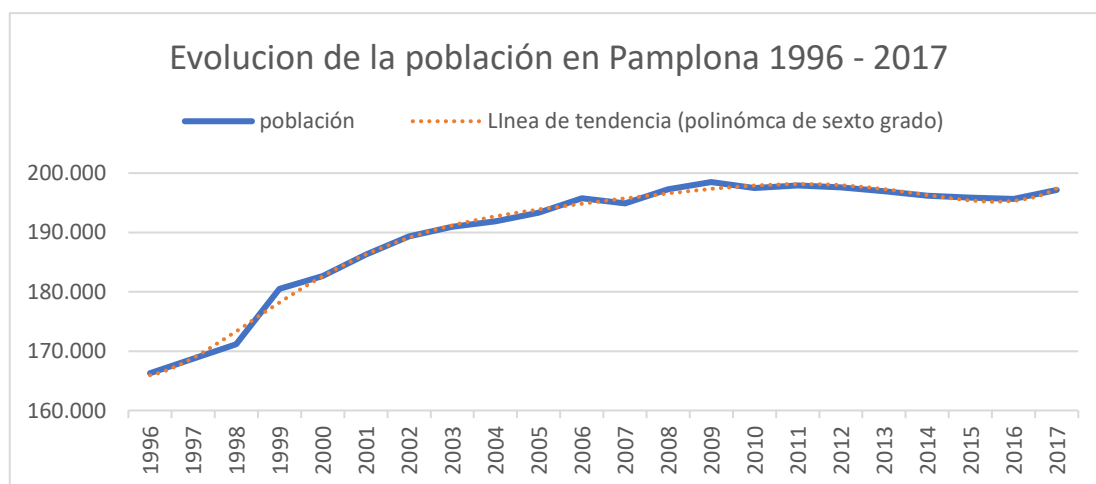


Figura 10. Evolución de la población en Pamplona 1996 - 2017

Se observa una evolución ascendente de la población, dato que agravará la situación de riesgo en caso de que se produzcan eventos inundación.

2. Focalizando en análisis en los barrios que se pudieran llegar a ver afectados por este riesgo de inundación sobre el que se realiza el estudio, se aprecia en los últimos 5 años un decremento de la población en los mismos, pudiéndose deber a causa de la peligrosidad de inundación, así como por la aparición de viviendas de nueva construcción.

| BARRIOS | Población 2010 | Población 2011 | Población 2012 | Población 2013 | Población 2014 | Población 2015 | Diferencia 2010 - 2015 |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| Casco Viejo | 11.572 | 11.467 | 11.428 | 11.243 | 10.996 | 10.854 | -718 |
| Chantrea | 20.145 | 20.213 | 20.210 | 19.982 | 19.931 | 19.828 | -317 |
| Ermitagaña | 16.738 | 16.745 | 16.863 | 16.617 | 16.970 | 16.921 | 183 |
| Rochapea | 25.621 | 25.831 | 25.845 | 25.929 | 25.636 | 25.560 | -61 |
| San Jorge | 11.716 | 11.896 | 12.036 | 11.978 | 11.835 | 11.750 | 34 |
| San Juan | 20.841 | 20.447 | 20.351 | 20.040 | 20.470 | 20.339 | -502 |
| | 106.633 | 106.599 | 106.733 | 105.789 | 105.838 | 105.252 | -1.381 |

Tabla 5. Evolución de la población por barrios 2010 - 2015



Figura 11. Áreas afectadas por riesgo de inundación.



3. En el análisis de los rangos de edades, las proyecciones a más largo plazo resultan dramáticas ya que se aprecia un descenso de población entre edades de 0a 4 años, además de un aumento considerable de la proporción de personas de la tercera edad, al igual que ocurre en el resto de España. En la gráfica que se muestra a continuación se representa la variación del índice de envejecimiento durante estos años, el cual tiene una tendencia dramáticamente ascendente.

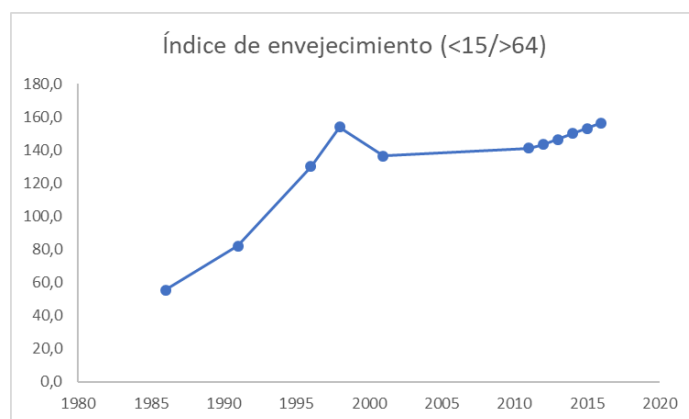


Figura 12. Índice de envejecimiento según el INE

4. La distribución espacial de la población muestra una tendencia a la concentración de la población en la capital de la comunidad Foral, Pamplona, a costa de un fuerte decrecimiento de la población en el medio rural.

3.2.2. Uso de suelos

La información a recopilar tiene que servir para la evaluación de los impactos significativos o consecuencias potenciales negativas a la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica que se requiere. Para ello se emplearon todas las fuentes que permitieran identificar los elementos expuestos a las inundaciones:

- Base Cartográfica Numérica a escala 1:5.000 (BCN25)
- Ortofotos del PNOA
- Imágenes aéreas del Google Earth
- Catastro del Gobierno de Navarra
- CNIG (Centro Nacional de información geográfica)
- SITNA (Sistema de Información Territorial del Gobierno de Navarra)
- IDENA (Portal de acceso a información Geográfica de Navarra)
- SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España)

3.2.3. Actividad económica

El análisis de la actividad económica se ha basado en los datos publicados por el INE en la Contabilidad Regional de España y en la del NASTAT (Instituto Navarro de estadística). En concreto, se ha trabajado con el Valor Añadido Bruto (VAB) a precio de mercado, tanto a escala regional como en su presentación desagregada por concejos, considerando:

- Evolución del VAB a precios corrientes de Navarra de 2005 - 20015.
- VAB a precios corrientes según sectores económicos.
- VAB a precios de mercado según sectores económicos.

| VAB (a precios de mercado) | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| *miles de euros | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 (p) | 2015 (a) |
| Agricultura, ganadería caza y servicios relacionados con la misma | 454.277 | 463.139 | 487.005 | 489.733 | 487.149 | 488.510 | 511.683 | 531.922 | 542.310 | 550.830 | 558.645 |
| Industria incluida la energía | 4.244.297 | 4.493.914 | 4.844.599 | 5.129.708 | 4.780.696 | 5.004.667 | 5.231.221 | 5.101.700 | 5.079.661 | 5.262.900 | 5.443.669 |
| Construcción | 1.385.602 | 1.637.449 | 1.862.972 | 1.987.080 | 1.857.403 | 1.660.583 | 1.570.953 | 1.387.997 | 1.216.421 | 1.140.705 | 1.158.956 |
| Actividades de los servicios | 8.073.914 | 8.550.021 | 9.157.443 | 9.700.624 | 9.775.062 | 9.759.561 | 9.930.846 | 9.875.370 | 9.708.963 | 9.743.934 | 10.020.279 |
| TOTAL | 14.158.090 | 15.144.523 | 16.352.019 | 17.307.145 | 16.900.309 | 16.913.321 | 17.244.703 | 16.896.989 | 16.547.355 | 16.698.369 | 17.181.548 |
| Crecimiento Interanual | | 6,97% | 7,97% | 5,84% | -2,35% | 0,08% | 1,96% | -2,02% | -2,07% | 0,91% | 2,89% |
| Crecimiento con respecto al 2008 | -18,20% | -12,50% | -5,52% | 0,00% | -2,35% | -2,28% | -0,36% | -2,37% | -4,39% | -3,52% | -0,73% |

Tabla 6. Variación del VAB

De estos datos podemos extraer los siguientes resultados preliminares:

1. La tasa de crecimiento interanual del VAB per cápita se ha situado en el entorno del -2%, es decir, se observa un decrecimiento de del VAB interanual

3.2.4. Stock per cápita

El análisis del stock de capital de la de la ciudad de Pamplona se ha basado en los datos proporcionados por el Catastro del Gobierno Foral, actualizados por última vez en 2015.

Se define valor catastral como un valor administrativo determinado objetivamente para cada bien inmueble a partir de los datos que existen en el catastro inmobiliario y que está integrado por el valor catastral del suelo y el valor catastral de las construcciones. Está integrado, por dos valores: el valor del suelo y el valor de la construcción.

Particularizando para Pamplona, se disponen de los siguientes datos:

| | |
|------------------------------------|------------------|
| Valor Catastral Total (€) | 9.712.373.106,49 |
| Valor Catastral exento (€) | 2.190.418.380,02 |
| Valor Catastral sujeto a CT (€) | 7.521.954.726,47 |
| Valor Catastral suelo (€) | 4.780.632.936,69 |
| Valor Catastral const. e inst. (€) | 4.961.740.169,80 |

Tabla 7. Desglose del Valor Catastral de Pamplona



A partir del valor catastral total de 9.712.373.106,49 €, se obtiene el valor catastral per cápita:

$$\text{Valor per cápita} = \frac{9.712.373.106,49 \text{ €}}{197.138 \text{ hab}} = 49.266,87 \text{ €/hab}$$



4. Aplicación al caso de estudio

4.1. Caracterización de la amenaza

Las inundaciones son eventos caracterizados por el tránsito o acumulación de agua por fuera de los cauces de los ríos (lechos mayores) y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje naturales o construidas. Típicamente, se generan por la combinación de lluvias intensas, cambios en las condiciones del flujo en los ríos; otras veces, por fallas en los sistemas o estructuras construidos para la regulación hidráulica, por procesos de urbanización inadecuados o simplemente por manejo inadecuado de basuras o invasión de las rondas de los ríos.

Las inundaciones son eventos recurrentes, propios de la dinámica natural de las cuencas hidrográficas. El análisis de la amenaza de inundación involucra tres fases principales:

- (a) Análisis geomorfológico de la cuenca y el cauce del río
- (b) Modelos hidrológicos
- (c) Modelos hidráulicos

Con el primero se busca, esencialmente, investigar la dinámica histórica del río, con el segundo se intenta modelar la respuesta del sistema fluvial a los eventos climatológicos y con el tercero se busca establecer las características de una inundación potencial en un determinado tramo del cauce de un río o zona inundable.

Una inundación puede caracterizarse a través de uno o varios parámetros, como por ejemplo el área inundada, la profundidad de inundación en cada punto, la velocidad del flujo, el tiempo de arribo (concentración) y el tiempo de inundación. Dado que las lluvias y tormentas que disparan las inundaciones pueden representarse como un conjunto de eventos estocásticos con determinadas características de intensidad y frecuencia de ocurrencia, los modelos hidrográficos e hidráulicos permiten establecer la relación entre el periodo de retorno de una determinada tormenta y los parámetros de intensidad de la inundación.

El área de influencia, en un análisis de amenaza de inundación, corresponde tanto a la cuenca hidrográfica en la que está localizada el río en estudio como al área potencialmente inundable (planicie de inundación, lecho mayor). El área de influencia puede cambiar según el nivel de resolución de los estudios y sus objetivos.

En este análisis dicho área de influencia se ha definido como una mancha de inundación que discretiza las áreas inundadas y la cota de inundación de las mismas. Es por tanto que se define dicha mancha de inundación como el indicador de la amenaza a la que población y activos residenciales están expuestos.

Dichas superficies se calculan utilizando un modelo hidráulico acoplado 1D-2D que está sujeto a una carga externa extrema en forma de precipitación con un período de retorno dado. Dada la carga externa, la relación precipitación-escorrentía, el sistema hidráulico del sistema de alcantarillado y el terreno, es posible calcular el alcance y la profundidad de la inundación en el entorno urbano. El resultado de la evaluación de riesgo de inundación es una instantánea de la



profundidad máxima de agua calculada para la carga externa de entrada en un punto dado en el tiempo.

En este caso de estudio dicho material se ha obtenido del Centro Nacional de información Geodésica (CNIG) el cual proporciona mapas de Peligrosidad por inundación fluvial elaborados por el Ministerio de España.

Como bien viene descrito por el ministerio, este servicio contiene los mapas de peligrosidad de las zonas identificadas en la evaluación preliminar como Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) elaborados en cada Demarcación por las autoridades competentes en materia de aguas, costas y protección civil (SNCZI-IPE. 2018).

Se han estudiado tres escenarios en función de la probabilidad estadística de ocurrencia de la inundación: alta probabilidad (asociada a un período de retorno igual a 10 años), probabilidad media (asociada a un período de retorno de 100 años) y baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos (período de retorno igual a 500 años).

En relación con el concepto de periodo de retorno, es importante realizar determinadas aclaraciones.

En términos numéricos, es equivalente a la probabilidad de que se presente un caudal de avenida igual o superior en un determinado año, es decir, la probabilidad de que se supere el caudal en un año. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 10 años, esa probabilidad $F(x) = 1/T = 1/10 = 0.1 = 10\%$. Es decir, existe un 10% de probabilidad de que un año se supere ese valor de caudal y un 90% de probabilidad de que no se supere.

Sin embargo, eso no implica que no puedan producirse dos o más avenidas de tal o superior intensidad dentro del mismo año, al ser el periodo de retorno un concepto estadístico y depender de la duración del intervalo considerado.

En el caso de que queramos calcular la probabilidad de que se iguale o supere ese valor durante un periodo de N años (concepto estadístico de Riesgo), se calcularía mediante la siguiente expresión:

$$1 - \left[1 - \frac{1}{T}\right]^n$$

La cartografía de peligrosidad se completa con la elaboración de los mapas de riesgo para las mismas zonas y ambos mapas, de peligrosidad y riesgo, constituyen la base para el desarrollo de los correspondientes Planes de gestión del riesgo de inundación.

Por tanto, se han obtenido los mapas de peligrosidad de inundación fluvial para cada uno de los periodos de retorno de análisis. A la ciudad de Pamplona le corresponden dos mallas de inundación diferentes sobre las que se ha trabajado para constituir una maya conjunta de inundación.

Para llevar a cabo esta tarea se ha utilizado código de programación, para poder así unir las dos mayas, además de reducir el peso de los archivos, discretizando la zona de interés. Para cada

uno de los periodos de retorno se ha llevado a cabo el mismo procedimiento, el cual se describe a continuación.

Por tanto, primeramente, se han cargado los ráster de inundación que se han obtenido del CNIG así como la región que delimita la Ciudad de Pamplona. Como bien se han dicho serán dos ráster.

```
32 # 0. CARGAR REGIÓN
33 Pamp.reg <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Po[Municipio.shp]")
34
35
36 # 1. CARGAR RÁSTER
37 Pamp.flood.1 <- raster("01. Peligrosidad de Inundación/T10/es091_ebro_t010_aar_01a03_t010_1_back-32767_25830_a2.asc")
38 Pamp.flood.2 <- raster("01. Peligrosidad de Inundación/T10/es091_ebro_t010_aar_01a03_t010_2_back-32767_25830.asc")
39
```

Figura 13. Código para el procesamiento de la mancha de inundación

Posteriormente se han recortado por la zona de estudio, eliminado aquellas partes del ráster que no era necesario tener en cuenta. De este modo se consigue reducir el tamaño de los archivos y por tanto conseguir archivos menos pesados y manejables.

Una vez se han obtenido los archivos recortados se han unido en un único ráster que posteriormente se utilizará para analizar la población y activos residenciales afectados por riesgo de inundación.

```
41 # 2. CORTAR RÁSTER POR ZONA DE ESTUDIO
42 flood.crop1 <- crop(Pamp.flood.1,Pamp.reg)
43 flood.crop1 <- mask(flood.crop1,Pamp.reg)
44
45 flood.crop2 <- crop(Pamp.flood.2,Pamp.reg)
46 flood.crop2 <- mask(flood.crop2,Pamp.reg)
47 flood.crop2[flood.crop2== -32767] <- NA
48
49
50 # 3. UNIR LOS DOS RÁSTER DE INUNDACIÓN
51 Pamp.flood <- merge(flood.crop1, flood.crop2)
52
```

Figura 14. Código para el procesamiento de la mancha de inundación

En el segundo de los ráster a recortar, se puede comprobar que hay una línea más de código, esto se debe a que en los datos descargados del CNIG existía algún dato incoherente puesto que daba cotas de inundación negativas algo imposible. Por ello, se ha tomado dicha cota como nula obteniendo así una representación de los datos coherente.

Para finalizar se ha querido representar las manchas de inundación de cada uno de los tres periodos de retorno que se han estudiado, (T=10 años, T=100 años y T=500 años), observando así la diferencia de zonas afectadas entre unos y otros. Es evidente que en el periodo de retorno de 500 años las zonas inundadas serán mayores pues representa la mancha de inundación debida a un evento que sucede una vez cada 500 años.

En dichas figuras se ha representado la mancha de inundación, los límites de la ciudad y las superficies edificadas.

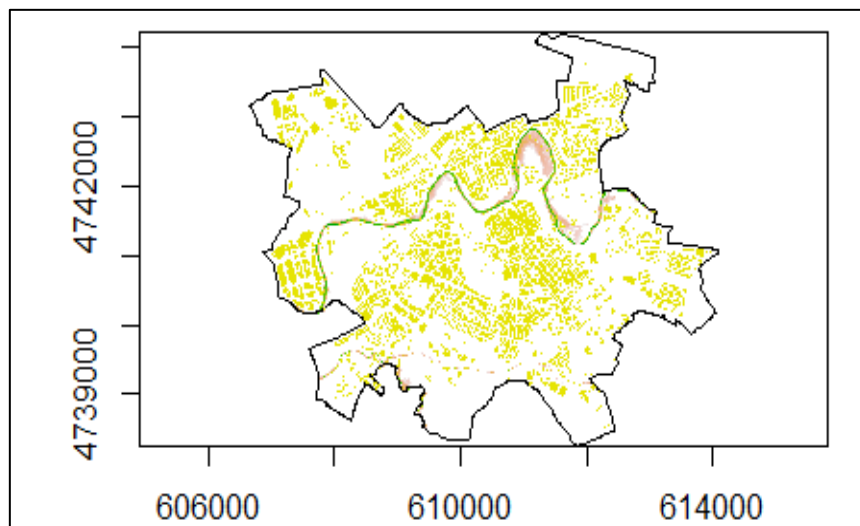


Figura 15. Mapa de la mancha de inundación T=10

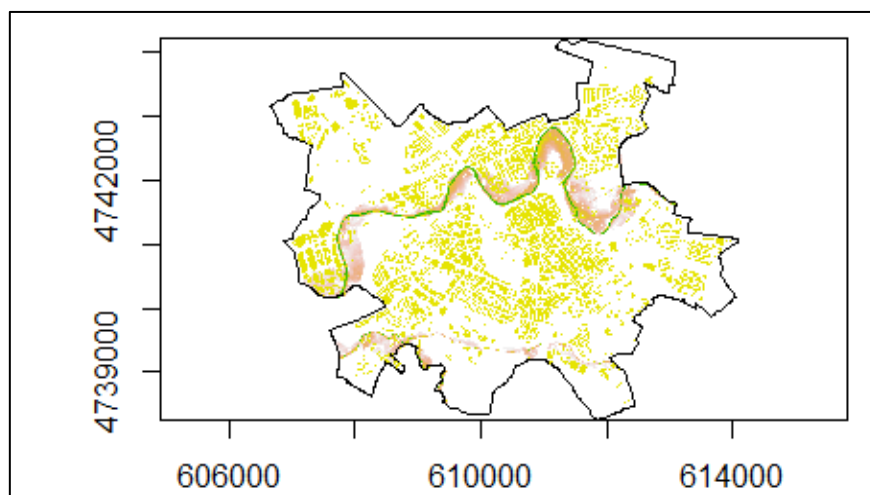


Figura 17. Mapa de la mancha de inundación T=100

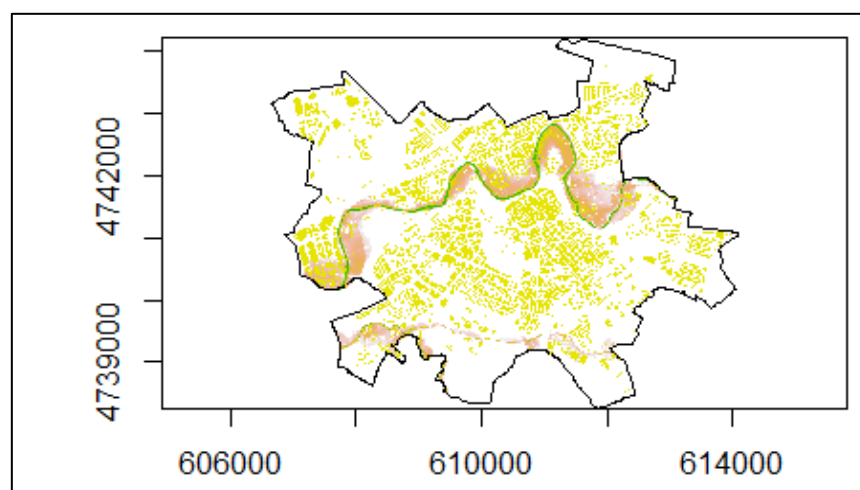


Figura 16. Mapa de la mancha de inundación T=500



4.2. Caracterización de la exposición

La exposición hace referencia a los elementos que están sujetos al impacto de una amenaza específica. Los principales elementos en riesgo son la población, trabajos de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos e infraestructura, etc.

En este caso se localizará el análisis en el estudio de la población y activos residenciales afectados por eventos de inundación, para lo cual se analizarán diferentes periodos de retorno, (10, 100 y 500 años) y se evaluará la población y activos afectados en cada uno de los casos.

Para el análisis y evaluación de todos estos datos se ha trabajado con lenguaje de programación en RStudio, y se han utilizado diferentes bases de datos obtenidas gracias a distintas entidades, como son, el Gobierno de Navarra, el Instituto Nacional de Estadística o Global Human Settlement Layer, entre otras.

Como se podrá comprobar a continuación dado que los datos provienen de fuentes diferentes, se ha creído conveniente transformar toda la información a una misma referencia y formato, para hacer más sencillo el análisis y poder trabajar con ellos de forma más cómoda.

4.2.1. Población

Para el análisis de la población, se han utilizado tres enfoques diferentes, donde cada uno de ellos discretiza la población de una forma distinta, siendo el enfoque 1 el más general y el enfoque 3 el más detallista, como se describirá a continuación.

Se ha partido de distintas bases de datos para la obtención de la información necesaria, es decir, en el primer enfoque se ha optado por utilizar la información proporcionado por Global Human Settlement Layer, tratándose ésta de una plataforma mundial, la cual dispone de datos de población de todo el mundo.

Por el motivo previamente expuesto, se trata de un centro de información donde el nivel de detalle es menor que el utilizado en otras bases de datos con información más específica, como es el caso de la utilizada en los enfoques 2 y 3. Así pues, la resolución máxima que se puede obtener de esta fuente es de 250m lo cual es la principal causa por lo que los resultados que se obtengan con este enfoque difieren bastante del resto de enfoques.

Por otro lado, en el segundo y en el tercero de los enfoques se ha partido de datos obtenidos del catastro del Gobierno de Navarra. En el enfoque 2, se ha tomado como capa base la superficie residencial edificada como se mostrará posteriormente, lo cual hace que el reparto de la población que se consigue sea mucho más realista, y por tanto, resultados mucho más objetivos que los obtenidos con el primer enfoque.

Por último, el tercer enfoque también se ha basado en la obtención de datos en base al catastro del Gobierno de Navarra, lo cual es el punto de partida para concluir que los resultados obtenidos por el enfoque 2 y 3 estén más próximos entre ellos que los obtenidos en el primero. Si embargo, el enfoque 3 siempre proporcionará resultados más certeros pues se ha utilizado



una mayor cantidad de información, es decir, además de utilizar la superficie residencial edificada se ha tenido en cuenta las alturas de todos y cada uno de los edificios que constituyen el municipio de Pamplona, lo cual garantiza una mejor distribución de la población, colocando mayor cantidad de población en aquellos edificios con más altura.

Por ende, en el análisis que se expone a continuación se podrán apreciar las diferencias entre cada uno de los tres métodos y por consiguiente la variación en los resultados obtenidos entre unos y otros.

4.2.1.1. Enfoque 1

Para el primero de los enfoques se ha trabajado con bases de datos de población obtenidas de Global Human Settlement Layer. Esta base de datos proporciona un ráster espacial que representa la distribución y la densidad de la población, expresada como el número de personas por celda.

El marco analítico de la imagen GHSL ha sido probado con un gran conjunto de sensores que incluyen el radar y las misiones ópticas públicas y comerciales.

Son datos actualizados del 2015, y se trata de una estimación de las poblaciones residenciales provistos por CIESIN GPWv4 que se de unidades censales o administrativas a celdas de la cuadrícula, obtenidas según la distribución y densidad acumulada del *Global Human Settlement Layer (GHSL)*. Este tipo de mapas de asentamiento europeos son capas construidas a partir de imágenes de mayor resolución.

Para este análisis se ha utilizado un raster de resolución 250m, la máxima que proporciona este sistema, y, de la misma, se ha obtenido un mapa de densidades de población de la ciudad de Pamplona.

Primeramente, es necesario cargar los datos sobre los que se ha venido hablando para poder trabajar sobre ellos. Como se muestra en la figura 18, con el nombre de *worl_pop* se ha cargado el ráster de población global desde el que se han extraído los datos que sean necesarios, en este caso, únicamente será de interés la población de Pamplona.

Para ello, junto con lo anterior, también se ha cargado la capa denominada *Pamp.reg*, que es una polilínea que incluye los límites de la ciudad de Pamplona. A esta región se hará referencia durante todo el análisis, pues será necesaria constantemente para discretizar el área de estudio, de este modo intentar reducir el tamaño de los archivos sobre los que se trabajará.

La región de la que se habla es un archivo tipo .shp que se ha obtenido del catastro proporcionado por el Gobierno de Navarra, en el apartado de Servicio de Riqueza Territorial de Navarra. Estos datos quedan reflejados y analizados posteriormente en la tabla 8.

```
66
67 # 1. CARGAR POBLACIÓN GHSL
68 world_pop <- raster("C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/01. worldPop/GHSL_pop_250.tif")
69
70 # 2. CARGAR AREA DE ESTUDIO
71 Pamp.reg <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Pol_Municipio.shp")
72
73 # 3. RECORTAR POR LÍMITES PAMPLONA
74 Pamp.reg.GHSL <- spTransform(Pamp.reg, crs(world_pop))
75 Pamp.pop.GHSL <- crop(world_pop, Pamp.reg.GHSL)
76
77 #plot(world_pop)
78 #plot(Pamp.pop.GHSL)
79 #plot(Pamp.reg.GHSL, add=TRUE)
80
```

Figura 18. Código para la obtención de la población según el enfoque 1

Como se especifica en la figura 18 el siguiente paso consistirá en recortar por la zona de estudio requerida, para lo cual, se quiere que los dos archivos estén en el mismo formato. Por ende, se ha transformado la región a un ráster mediante la función *spTransform*. Ahora ya se puede proceder a recortar la población, *Pamp.pop.GHSL*. Con ello se ha conseguido, que el archivo de trabajo sea mucho menos pesado y más manejable.

A continuación, se ha tenido en cuenta que la resolución de la mancha de inundación obtenida de la base de datos del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), es distinta a la de la población mundial obtenida del *Global Human Settlement Layer (GHSL)*, siendo la primera de ellas de 1m y la segunda de 250m como se ha mencionado con anterioridad. Como resultado, se ha ajustado a la resolución de la mancha de inundación. Esto se muestra en la figura 19.

```
81
82 # RESAMPLE TO FLOOD RESOLUTION (1m)
83 Pamp.pop.1m <- projectRaster(from=Pamp.pop.GHSL, to=Pamp.flood, method = "bilinear")
84
```

Figura 19. Código para la obtención de la población según el enfoque 1

Por último, para ajustar un poco más los datos a la realidad, y dado que se conoce la población total actual de Pamplona gracias al Instituto Navarro de Estadística, siendo esta de 197.138 habitantes en 2017, se ha procedido a distribuir dicha población según las densidades de población dispuestas en el ráster de población que se ha obtenido con anterioridad y con resolución de 1m guardado en *Pamp.pop.1m*. Este paso se muestra en la figura 20.

```
88 # 4. VERIFICACIÓN POBLACIÓN TOTAL
89 pop.mask <- mask(Pamp.pop.1m, Pamp.reg)
90 pop.sum.a <- cellStats(pop.mask, stat='sum', na.rm=TRUE)
91 pop.sum.b <- 197138 #población Pamplona
92 pop.corregido <- pop.mask*(pop.sum.b/pop.sum.a)
```

Figura 20. Código para la obtención de la población según el enfoque 1

Con todo ello, con el nombre de *pop.corregido* se almacena la información referente al ráster de población de la ciudad de Pamplona de 197.138 habitantes, según las densidades de población por celda proporcionadas por *Global Human Settlement Layer*. De manera gráfica y más visual se muestra en la figura 21.

Se observa, como era de esperar, que no todas las zonas tienen la misma densidad de población, habiendo regiones más pobladas que otras, aunque por lo general existe cierta homogeneidad en la distribución de la población.

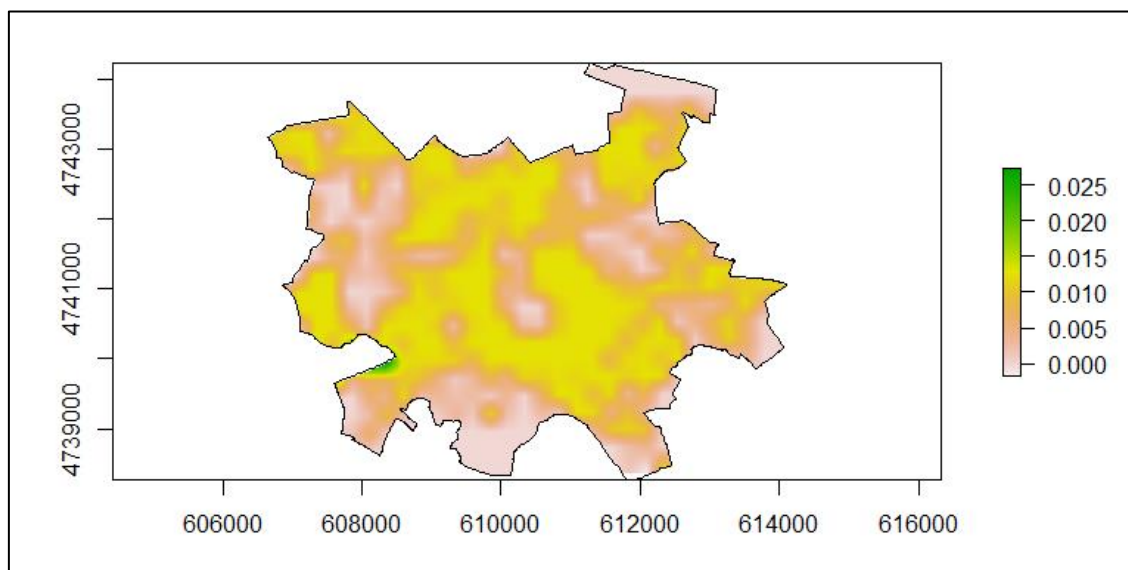


Figura 21. Reparto de la población en Pamplona según el enfoque 1

Para finalizar se han guardado los resultados obtenidos en un archivo tipo .tiff para poder utilizarlos y ser analizados con posterioridad.

4.2.1.2. Enfoque 2

En este segundo enfoque, se ha discretizado un poco más la población, es decir, se ha ubicado de una manera más realista en el entorno de Pamplona. Para ello se ha hecho uso de datos e información proporcionada por el Gobierno de Navarra, referente a información catastral.

El catastro proporcionado por el Gobierno de Navarra divide la comunidad en distintos municipios siendo el referente a la ciudad de Pamplona el 201, y, es este el que se ha utilizado en el análisis. Dicho catastro proporcionado en formato .shp, consta de las capas que se muestran en la tabla 8.

| Campos | Campos |
|-------------------------------|-------------------------------|
| CATAST_Lin_CalleEje | CATAST_Pol_Poligono |
| CATAST_Lin_Pavimento | CATAST_Pol_SubparRusti |
| CATAST_Pol_CascoUrbano | CATAST_Pol_SubparUrba |
| CATAST_Pol_Concejo | CATAST_Txt_EdifAlturas |
| CATAST_Pol_EdifEspecial | CATAST_Txt_ParcelaMixta |
| CATAST_Pol_Edificacion | CATAST_Txt_ParcelaRusti |
| CATAST_Pol_Municipio | CATAST_Txt_ParcelaUrba |
| CATAST_Pol_ParcelaMixta | CATAST_Txt_Portal |
| CATAST_Pol_ParcelaRusti | CATAST_Txt_Subparcela |
| CATAST_Pol_ParcelaUrba | CATAST_Pol_ParcelaVia |

Tabla 8. Capas del catastro de Navarra

No todas serán necesarias pues solo interesan aquellas que aporten información sobre edificaciones residenciales. En este caso se trata de la capa CATAST_Pol_Edificacion, en la cual se ubican las áreas de los diferentes edificios residenciales que constituyen la ciudad de Pamplona.

Además de ésta, como ya se ha mencionado con anterioridad, también se resalta como capa importante la denominada CATAST_Pol_Municipio, ya que de ella se han obtenido los límites de la ciudad, es decir, lo que anteriormente se ha denominado región. En la figura 22 se muestra lo incluido en ambas capas y, sobre lo que se va a trabajar en este enfoque.

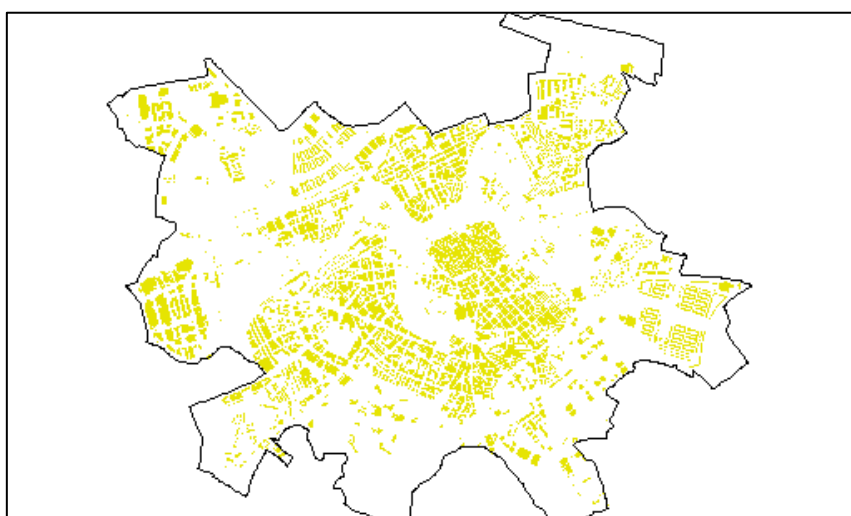


Figura 22. Superficie de edificios proporcionada por el Catastro

En este segundo enfoque se ha distribuido el dato de población de Pamplona, sobre la superficie de los edificios, sin tener en cuenta aquellas zonas de Pamplona que no estén edificadas, obteniendo así una representación más realista de la distribución de la población sobre el plano.

De este modo, si comparásemos las densidades de población obtenidas en el anterior enfoque y en éste, podríamos observar que las densidades de este segundo enfoque serán mayores dado que la superficie en la que distribuir la población es menor, y con ello más preciso.

Comenzando a analizar el código que se ha desarrollado para llevar a cabo este enfoque, al igual que en el apartado anterior, es necesario cargar datos como la región de la ciudad o alguna de las manchas de inundación, dado que se utilizarán como referencia para transformar los datos a formato similar al de la mancha de inundación y así posteriormente será más fácil poder unir o trabajar con ambas bases de datos a la vez.

```
144 # 1. INTRODUCCION CATASTRO
145 Pamp.edif <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Pol_Edificacion.shp")
146
```

Figura 23. Código para la obtención de la población según el enfoque 2

Una vez introducido lo mencionado, como primer paso en este segundo enfoque es introducir las superficies de edificación del archivo .shp, con el comando que se muestra en la figura. De él se obtienen las superficies que se aprecian de color amarillo en la figura 23.

Seguidamente se ha creado se ha generado un ráster unitario que se utilizará de base para generar posteriormente el ráster que contenga los edificios. La filosofía de estos comandos es generar un ráster con la forma de las superficies de los edificios, para posteriormente proyectar sobre ella la población.

Para ello se ha generado primeramente un campo nuevo en el shape denominado *Pamp.Edif* de tal modo que dicho campo tenga todo el valor 1 cuando haya un edificio y el valor 0 en caso de no haber nada (paso 3). A continuación, se rasteriza este campo, tomando como base el ráster *dummy* que se ha creado previamente. De este modo se podrán manipular los datos de modo más sencillo.

```
148 # 2. CREAR RASTER UNITARIO
149 dummy <- Pamp.flood
150 dummy[] <- 1
151
152 # 3. CREAR NUEVO CAMPO EN POP.EDIF (EDIFICIO=1, VACIO=0)
153 Pamp.edif$new <- 1
154
155 # 4. RASTERIZAR EL SHP DE EDIFICIOS
156 Pamp.edif.dummy <- rasterize(Pamp.edif, dummy, 'new')
157 plot(Pamp.edif.dummy)
158 plot(Pamp.reg, add=TRUE)
```

Figura 24. Código para la obtención de la población según el enfoque 2

Por último, se ha colocado la población de 197.138 habitantes en la superficie ráster generada, distribuyendo así la población a lo largo de toda la superficie. Finalmente se guardado en archivo en formato tipo .tiff, pues será utilizado con posterioridad.

```
161 # 5. CORREGIR POBLACIÓN
162 Pamp.edif.correg <- Pamp.edif.dummy*(197138/cellStats(Pamp.edif.dummy, stat='sum', na.rm=TRUE))
163 Pamp.pop_total <- cellStats(Pamp.edif.correg, stat='sum', na.rm=TRUE)
164
165 # 6. GUARDAR RESULTADOS
166 writeRaster(Pamp.edif.correg, "c:/Users/marta/desktop/TFM_Sau/2.0/03. Resultados/Población/Pamp_Pob_Enfoque2", format = "GTiff", overwrite=TRUE)
167
```

Figura 25. Código para la obtención de la población según el enfoque 2

El resultado final de este código es una población repartida de manera homogénea en toda la superficie, sin tener en cuenta mayores y menores concentraciones de densidad de población según las características del edificio.

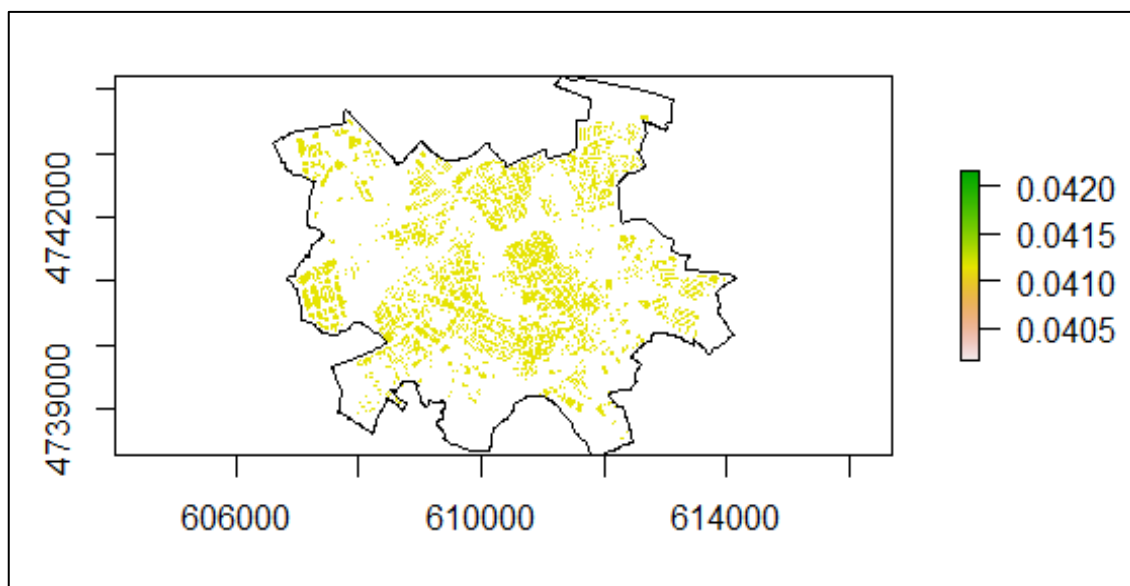


Figura 26. Reparto de la población en la superficie edificada según el enfoque 2

Comparando los resultados obtenidos en el enfoque 1 y en el enfoque 2, y plasmando ambas soluciones en un único plano se puede comprobar el reparto del que se hablaba anteriormente. En el enfoque 1 se ha descrito la población como una mancha continua con una densidad de población variable a lo largo de toda la región, sin embargo en el segundo enfoque se ha discretizado más la zona minimizando así el error. Se puede observar como en zonas donde no existen edificios en el enfoque 2, en el enfoque 1 indica que existe población, lo cual es obviamente un error y marca la diferencia entre ambos enfoques.

Esta inexactitud del enfoque 1 también puede quedar reflejada en que coloca densidades de población superiores a 1 en el cauce del río, lo cual es muy impreciso, ya que la densidad de población en esos dominios debería de ser nula.

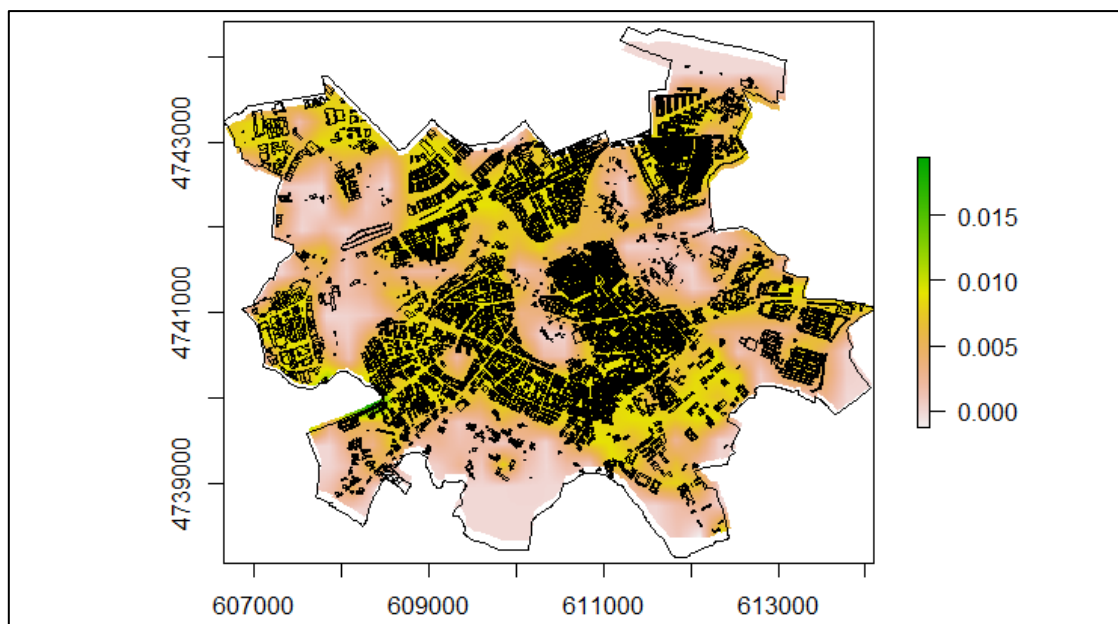


Figura 27. Representación del enfoque 1 sobre el enfoque 2

Todo ello se explicará con mayor detenimiento posteriormente al analizar el daño producido a causa de las inundaciones.

4.2.1.3. Enfoque 3

El último de los enfoques es el más preciso de todos ellos pues tiene en cuenta la ubicación de las edificaciones, así como el número de plantas de cada edificio, lo cual contribuye a que se pueda tener en cuenta la superficie real en la que distribuir a la población. De esta forma, se podrán encontrar zonas donde la densidad de población será superior a la densidad de otras zonas.

Para llevar a cabo este enfoque se creó una nueva capa en formato .shp, combinación de las capas CATAST_Pol_Edificacion y CATAST_Txt_EdifAlturas. Esta combinación era necesaria pues en una de las capas se encontraba la información referente a la superficie, y en la capa de puntos aparecía la información referente a la altura de los mismo, por lo que fue necesario combinarlas para poder trabajar con ella y con el resto de los datos.

Una vez obtenida esta capa y analizados los campos existentes, se observa que las alturas de los edificios están expresadas en números romanos, lo cual dificulta la tarea de análisis de los datos, por lo que será preciso transformar este campo a números reales.

Junto con ello hay que tener en cuenta que además de los pisos de cada uno de los edificios incluye sótanos, áticos y otras entidades, las cuales habrá que tener en cuenta a la hora de



traducir estos valores a número reales. Las entidades a tener en cuenta son las que se muestran en la tabla 9:

| Entidades | Simbología | Equivalencia Plantas |
|-------------|------------|----------------------|
| Sótanos | ST | 1 |
| Semisótanos | SS | 0 |
| Vestíbulo | VE | 0 |
| Entresuelo | EN | 0 |
| Principal | PR | 0 |
| Ático | AT | 0 |
| Azotea | AZ | 0 |
| Bajo | BJ | 0 |

Tabla 9. Tipos de alturas según el catastro

Como se podrá comprobar en el código que se mostrará a posteriori, a excepción de los sótanos, que, en el caso de Pamplona, llegan como mucho hasta 3 profundidades, el resto de las entidades no se han tenido en cuenta como alturas habitables, y por tanto han tomado el valor de cero. Sin embargo, los sótanos, al no conocer exactamente su funcionalidad, y para quedarse del lado de la seguridad, se han tomado como una planta normal habitable.

Para ejemplificar la situación anteriormente descrita, el edificio más alto de Pamplona consta de 17 plantas y 3 sótanos, por lo que se ha considerado que este edificio dispone de 20 plantas habitables.

Además, es evidente que el código necesario para analizar estos datos es algo más complicado que el utilizado para los casos anteriores. Por otro lado, los resultados que se obtendrán también serán más objetivos que en los enfoques anteriores.

Primeramente, es necesario cargar tanto la región de la ciudad de Pamplona como la mancha de inundación, para poder tomarlas como referencia y que todos los archivos tengan el mismo formato, para que posteriormente sea más sencillo su análisis e intersección de los mismos.

Seguidamente, se ha cargado la capa en formato .shp que se ha mencionado con anterioridad, combinación de la capa de puntos, en la que se encuentran las alturas de los edificios, con la capa que integra la superficie de las edificaciones que componen Pamplona. Como se observa en la figura 28, dicha capa se ha guardado con el nombre *alturas_catastro1*.

```
188 # 1. INTRODUCCIÓN CAPA ALTURAS DE EDIFICIOS
189 alturas_Catastro1 <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Join_Output.shp") |
190
```

Figura 28. Código para la obtención de la población según el enfoque 3

Para el análisis, los campos de interés se reducen únicamente al campo denominado "CADTEXT" donde se recogen las alturas en número romanos de los edificios. En la figura 29 se describe el código utilizado para transformar dichos números romanos.

Se ha creado un nuevo campo denominado *alturas*, en el que se van guardando los resultados obtenidos. Se genera un ciclo *for* que va recorriendo toda la columna CADTEXT, en las primeras líneas, transforma los números romanos propiamente dichos en números reales. Mas adelante, trabaja aquellas letras referentes a sótanos, áticos..., añade una altura en caso de tratarse de sótanos, y en el resto de casos no se tendrán en cuenta dichos elementos.

```

192 # 2. SUSTITUCIÓN CAMPO ALTURAS EN ROMANOS POR NUMEROS
193 alturas_Catastro1$ALTURAS <- 0
194
195 for (i in 1:length(alturas_Catastro1$CADTEXT)) {
196   alturas.value <- 0
197   aux.char <- strsplit(as.character(alturas_Catastro1$CADTEXT[i]), "[+]" )
198   niter <- length(aux.char)
199   for (j in 1:niter) {
200     if (grep1("M{0,4}(CM|CD|D?C{0,3})(XC|XL|L?X{0,3})(IX|IV|V?I{0,3})$", aux.char[[1]][j], ignore.case = FALSE)){
201       alturas.value <- alturas.value + as.numeric(as.roman(aux.char[[1]][j])) # Qué hacer SI es número romano
202     } else if (grep1("\\b[S|T|E]\\b", aux.char[[1]][j], ignore.case = FALSE)){
203       alturas.value <- alturas.value + 1 # Qué hacer SI es SOTANO, TERRAZA, ENTRESUELO
204     } else if (aux.char[[1]][j] == "SS"){
205       alturas.value <- alturas.value + 2 # Qué hacer SI es DOBLE SOTANO
206     } else if (aux.char[[1]][j] == "SSS"){
207       alturas.value <- alturas.value + 3 # Qué hacer SI es TRIPLE SOTANO
208     } else {
209       alturas.value <- alturas.value + 0 # Qué hacer SI es OTRA COSA
210     }
211   } alturas_Catastro1$ALTURAS[i] <- alturas.value
212 }
213
214 # 3. GUARDAR NUEVO SHP CON ALTURAS EN NUMERO
215 writeOGR(obj=alturas_Catastro1, dsn="c:/Users/marta/Desktop/TFM_Sau1_2.0/01. Catastro/grafico",
216         layer="CATAST_Join_Output",
217         driver="ESRI Shapefile", overwrite_layer=TRUE)
218

```

Figura 29. Código para la obtención de la población según el enfoque 3

Una vez recorrido todos los ciclos *for* y los ciclos *if* para cada uno de los casos mencionados anteriormente, en la línea 215 recopila toda la información en la misma capa de la que está extrayendo la información.

A continuación, se procede a convertir el campo nuevo denominado *Alturas* en un ráster como se ha realizado en los anteriores enfoques, necesario para luego poder comparar resultados.

Se rasteriza tomando como base un ráster unitario que se ha creado con el mismo formato que los ráster de inundación.

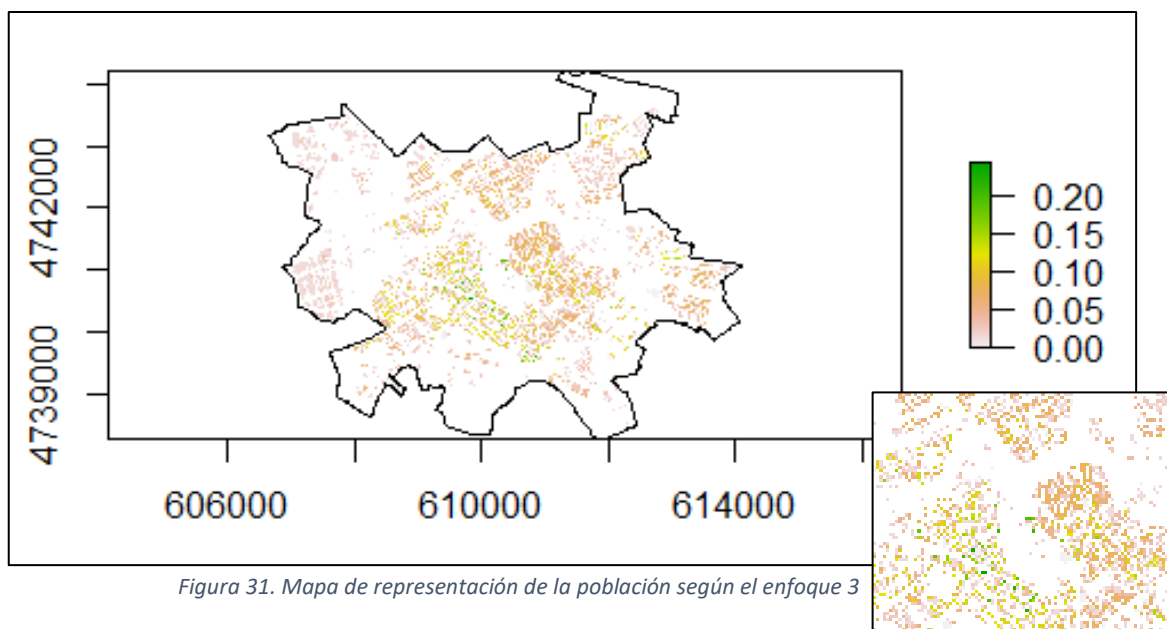
```

224 ~ ##### CONVERTIMOS TODO A RASTER PARA QUE SEA MAS MANEJABLE #####
225 ~ #####
226 ~ #####
227
228 # 4. RASTERIZAMOS EL CAMPO SHP ALTURAS DE LOS EDIFICIOS
229 # RASTERIZAMOS EL SHP DE EDIFICIOS
230 Pamp.alturas.dummy <- rasterize(alturas_Catastro1, dummy, 'ALTURAS')
231 plot(Pamp.alturas.dummy)
232 plot(Pamp.reg, add=TRUE)
233
234
235 # 5. CORREGIR POBLACIÓN
236 Pamp.alturas.correg <- Pamp.alturas.dummy*(197138/cellStats(Pamp.alturas.dummy, stat='sum', na.rm=TRUE))
237 Pamp.pop_total <- cellStats(Pamp.alturas.correg, stat='sum', na.rm=TRUE)
238
239
240 # 6. GUARDAMOS POBLACIÓN
241 writeRaster(Pamp.alturas.correg, "c:/Users/marta/Desktop/TFM_Sau1_2.0/03. Resultados/Población/Pamp_Pob_Enfoque3_T10", format = "
242 #writeRaster(plot(Pamp.edif.correg), "c:/Users/marta/Desktop/TFM_Sau1_2.0/03. Resultados/Población/Pamp_pob_enfoque03", format = "
243

```

Figura 30. Código para la obtención de la población según el enfoque 3

Por último, se proyecta sobre ese ráster generado la población, obteniendo así zonas donde la densidad de población será mayor en aquellos lugares donde los edificios sean más altos, ya que, por ende, la superficie habitable en ese lugar será mayor. Se conseguirá así una densidad de población no homogénea, sino que variará en función de cada zona. En la figura 31 se representa la distribución de la población según este tercer enfoque.



4.2.2. Activos residenciales

El procedimiento llevado a cabo para analizar los activos residenciales afectados es homologa al que se ha llevado a cabo previamente en el análisis de la población. En este caso en particular, el análisis se ha realizado en base al Valor Catastral de la Ciudad, obtenido de la base de datos económicos del catastro del Gobierno de Navarra.

Se define valor catastral como un valor administrativo determinado objetivamente para cada bien inmueble a partir de los datos que existen en el catastro inmobiliario y que está integrado por el valor catastral del suelo y el valor catastral de las construcciones. El objetivo es obtener valores homogéneos para tener relacionados con los valores de mercado. Está integrado, por dos valores: el valor del suelo y el valor de la construcción.

Particularizando para Pamplona, se disponen de los siguientes datos, los cuales se han utilizado para discretizar los activos residenciales de la ciudad.

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Valor Catastral Total (€) | 9.712.373.106,49 |
|----------------------------------|-------------------------|

Por tanto, el valor que se ha utilizado es un valor catastral total de 9.712.373.106,49 €. Ese valor catastral equivale a un valor catastral per cápita de:

$$\text{Valor per cápita} = \frac{9.712.373.106,49 \text{ €}}{197.138 \text{ hab}} = 49.266,87 \text{ €/hab}$$

Cabe mencionar que no se disponen datos muy actualizados de este valor, puesto que la Comunidad no los ha puesto al servicio del ciudadano todavía. Es por ello que el dato del valor Catastral sobre el que se está trabajando corresponde al año 2015.

Al igual que se ha llevado a cabo en el análisis de exposición de la población, para definir la distribución de los activos residenciales de Pamplona se han realizado tres enfoques diferentes, cuyos fundamentos son los mismos que los descrito anteriormente.

El primero de los enfoques es el menos preciso de todos, ya que distribuye la población sobre toda la superficie, como si de una mancha se tratara. Si que distingue entre zonas más o menos pobladas, lo cual corresponde con aquellas zonas con mayor valor catastral, pero si nivel de discretización es mínimo.

En cuanto al enfoque 2 y 3, ocurre lo mismo que lo descrito en el análisis de población, se obtienen mejores resultados dado que el estudio y la repartición de activos sobre la superficie está más próximo al reparto real, atribuyendo dicho valor solo a aquellas zonas donde verdaderamente haya edificación residencial.

A continuación, se explican dichos tres enfoques más en detalle.

4.2.2.1. Enfoque 1

Para el primero de los enfoques se ha repartido dicho valor residencial de manera proporcional a la ubicación de la población que se realizó en el enfoque 1 anterior. Por tanto, el primer paso a ejecutar, al igual que en todos los enfoques anteriores que se han realizado en torno a la población, es cargar tanto la región de Pamplona como la capa de población obtenida de la base de datos de Global Human Settlement Layer.

Una vez obtenidas dichas capas es necesario manipularlas hasta obtener como resultado final un ráster de población con la población de Pamplona en ella plasmada. Para lo cual se ha utilizado el código que se muestra a continuación, idéntico al utilizado en el enfoque 1.

```
68 # 1. CARGAR POBLACIÓN GHLS
69 world_pop <- raster("C:/Users/marta/Desktop/TFM_Sau1_2.0/01. worldPop/GHLS_pop_250.tif")
70
71
72 # 2. CARGAR AREA DE ESTUDIO
73 Pamp.reg <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Pol_Municipio.shp")
74
75
76 # 3. RECORTAR POR LÍMITES PAMPLONA
77 Pamp.reg.GHSL <- spTransform(Pamp.reg, crs(world_pop))
78 Pamp.pop.GHSL <- crop(world_pop, Pamp.reg.GHSL)
79
80
81 # 3. RESAMPLE TO FLOOD RESOLUTION (1m)
82 Pamp.pop.1m <- projectRaster(from=Pamp.pop.GHSL, to=Pamp.flood, method = "bilinear")
83 pop.mask <- mask(Pamp.pop.1m, Pamp.reg)
```

Figura 32. Código para la obtención de los activos residenciales según el enfoque 1

Una vez obtenido ese ráster, almacenado con el nombre de *pop.mask* se ha procedido a ejecutar el código propiamente dicho, referido a ubicar y analizar los activos residenciales. En la figura 32 se muestra dicho código. Se trata de una estructura muy simple, se remite a sumar todos los datos que conforman el ráster creado, *pop.mask*, y mediante una simple regla de tres, sustituir dichos datos por el valor catastral previamente mencionado de 9.712.373.106,49 €. De

este modo, se consigue repartir dicho valor catastral por toda la superficie de manera proporcional a la densidad de población de dichas zonas.

Por último, en la figura 34, se muestra el mapa resultado de los datos analizados. Como es

```
104 ### STOCK
105 # 6. Define stock per capita
106 pop.sum.a <- cellStats(pop.mask, stat='sum', na.rm=TRUE)
107 valor_catastral<-9712373106.49
108 Pamp.valorCatastral <- pop.mask*(valor_catastral/pop.sum.a)
109
110 # 7. GUARDAR EL ARCHIVO .TIFF
111 writeRaster(Pamp.valorCatastral, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/valor Catastral/Pamp_valor_Enfoque1_T10
112
```

Figura 33. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 1

lógico la gama de colores es la misma que la obtenida en el enfoque 1 de población, cambiando únicamente la escala de valores pues en este caso estamos trabajando con valores catastrales.

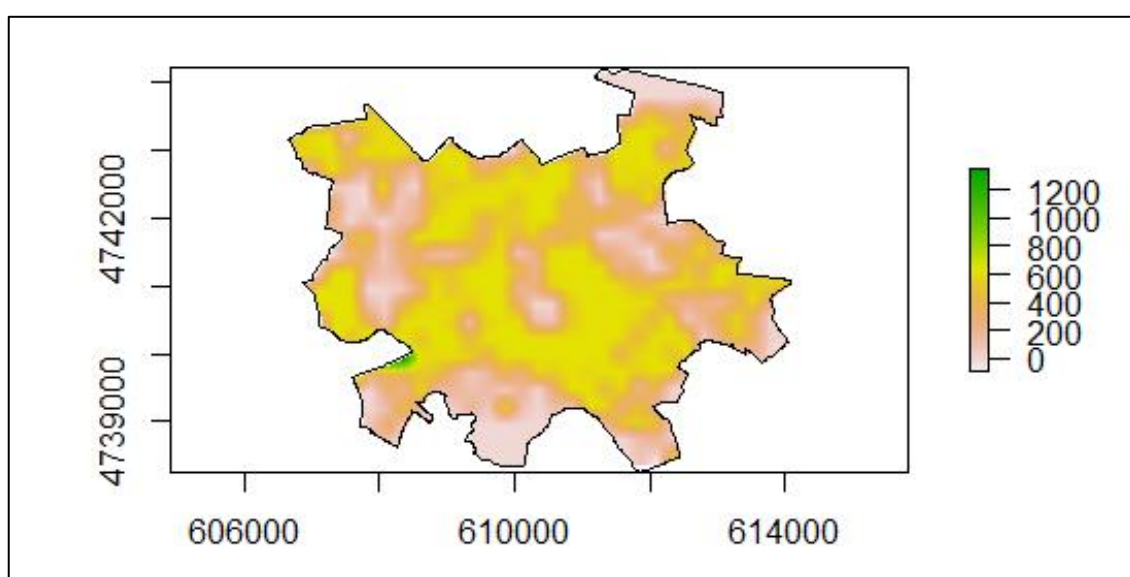


Figura 34. Mapa de reparto de los activos residenciales según el enfoque 1

4.2.2.2. Enfoque 2

Con respecto al segundo de los enfoques, se ha seguido con la misma filosofía, utilizar un procedimiento similar al utilizado en el enfoque 2 del análisis de población. Por tanto, los datos desde los que se parte son los mismos, todos ellos obtenidos del catastro facilitado por el Gobierno de Navarra. De dicho catastro interesan dos capas, CATAST_Pol_Edificacion y CATAST_Pol_Municipio en las cuales se encuentran las superficies de las edificaciones y los límites de Pamplona respectivamente. Todo lo referente a dichas capas se ha explicado previamente en el enfoque 1 por lo que se remite a dicho punto si se desea obtener más información sobre las mismas.

En este segundo enfoque, se trata de repartir el valor catastral únicamente en aquellos lugares donde haya edificaciones, así, en un futuro se obtendrán valores más exactos de los activos afectados por riesgo de inundación. Con ello se evitará disponer activos residenciales en

aquellos lugares donde realmente no debería de estar ubicados, obteniendo así una representación más precisa de la situación.

Analizando el código utilizado, los cuatro primeros pasos a ejecutar consisten en manipular los datos obtenidos del catastro de tal modo que se pueda obtener un ráster sobre el que poder plasmar el valor catastral de la ciudad. Los pasos que se han seguido son los siguientes:

1. Cargar la capa del catastro de interés (capa de edificaciones) en formato .shp.
2. Generar un ráster unitario con las mismas características que el ráster de inundación.
3. Generar un campo nuevo en *pamp.edif*, donde se almacene el valor 0 si no se han encontrado edificaciones y el valor 1 si en ese lugar hay edificios.
4. Rasterizar dicho campo tomando como referencia el ráster unitario generado en el paso dos.

```
142 # 1. INTRODUCCION CATASTRO
143 Pamp.edif <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Pol_Edificacion.shp")
144
145
146 # 2. CREAR RASTER UNITARIO
147 dummy <- Pamp.flood
148 dummy[] <- 1
149
150 # 3. CREAR NUEVO CAMPO EN POP.EDIF (EDIFICIO=1, VACIO=0)
151 Pamp.edif$new <- 1
152
153 # 4. RASTERIZAR EL SHP DE EDIFICIOS
154 Pamp.edif.dummy <- rasterize(Pamp.edif, dummy, 'new')|
155
```

Figura 36. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 2

A continuación, como se muestra en la siguiente figura 35, se ha procedido a introducir el total de los activos residenciales en el ráster de edificación generado anteriormente. De este modo se han repartido los activos de forma homogénea por toda la superficie edificada. En este enfoque no se ha tenido en cuenta si algunas edificaciones tienen mayor o menor altura.

```
165 # 7. STOCK
166 # Define stock per capita
167 valor_catastral<-9712373106.49
168 Pamp.valor.correg <- Pamp.edif.dummy*(valor_catastral/cellstats(Pamp.edif.dummy, stat='sum', na.rm=TRUE))
169 plot(Pamp.valor.correg)
170
171
172 # 8. GUARDAR EL ARCHIVO .TIFF
173 writeraster(Pamp.valor.correg, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Valor Catastral/Pamp_valor_Enfoque2
174
```

Figura 35. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 2

Para finalizar en la figura 37 se representan dichos activos repartidos en la superficie de la ciudad de Pamplona.

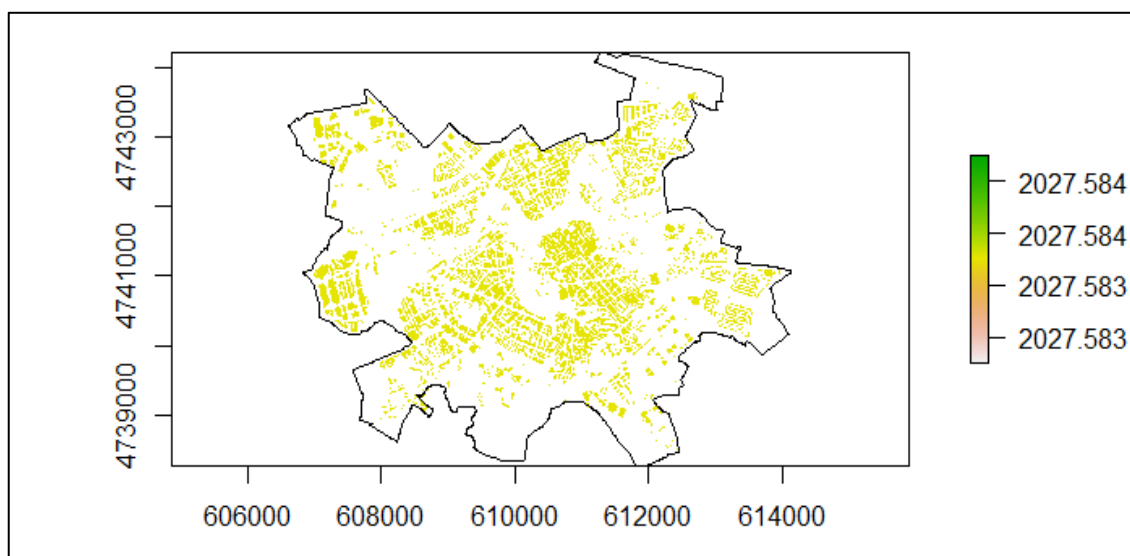


Figura 37. Mapa representación del reparto de los activos residenciales según el enfoque 2

4.2.2.3. Enfoque 3

En el último de los enfoques, además de tenerse en cuenta la distribución de las áreas edificadas en el espacio se ha tenido en cuenta la altura de los edificios lo cual ha contribuido a poder repartir de manera más equitativa el valor catastral o valor catastral per cápita, pues a mayor número de plantas tengan los edificios, más ciudadanos vivirán en ellos y por tanto mayor será el valor catastral asociado a dicha superficie.

Es por ello que los resultados obtenidos de este último enfoque serán los más precisos que los obtenidos en los dos enfoques anteriores.

Al igual que en el apartado de población, será necesario ejecutar ciclos *for* anidados con ciclos *if* para poder transformar los numero romanos en números reales, para crear un campo que se pueda transformar en ráster posteriormente. Sobre dicho ráster se proyectará el valor catastral, y se obtendrá así, el valor catastral per cápita repartido por la ciudad de Pamplona.

Primeramente, se ha cargado la capa que contiene la combinación de las superficies residenciales edificadas junto con las alturas de los edificios. En dicha capa se ha generado un nuevo campo denominado alturas en que gracias a los ciclos *for* e *if* que se muestran en la figura 39 se han ido introduciendo las alturas de cada una de las superficies.

```

181
182 # 1. INTRODUCCIÓN CAPA ALTURAS DE EDIFICIOS
183 alturas_Catastro1 <- readOGR("01. Catastro/grafico/CATAST_Join_Output.shp")
184 #plot(alturas_Catastro1)
185
186
187 # 2. SUSTITUCIÓN CAMPO ALTURAS EN ROMANOS POR NUMEROS
188 alturas_Catastro1$ALTURAS <- 0
189
190 for (i in 1:length(alturas_Catastro1$CADTEXT)) {
191   alturas.value <- 0
192   aux.char <- strsplit(as.character(alturas_Catastro1$CADTEXT[i]), "[+]" )
193   niter <- length(aux.char)
194   for (j in 1:niter) {
195     if (grepl("AM{0,4}(CM|CD|D?C{0,3})(XC|XL|L?X{0,3})(IX|IV|V?I{0,3})$", aux.char[[1]][j], ignore.case = FALSE)){
196       alturas.value <- alturas.value + as.numeric(as.roman(aux.char[[1]][j]))} # Qué hacer SI es número romano
197     else if (grepl("\\b[S|T|E]\\b", aux.char[[1]][j], ignore.case = FALSE)){
198       alturas.value <- alturas.value + 1} # Qué hacer SI es SOTANO, TERRAZA, ENTRESUELO
199     else if (aux.char[[1]][j] == "SS"){
200       alturas.value <- alturas.value + 2} # Qué hacer SI es DOBLE SOTANO
201     else if (aux.char[[1]][j] == "3S"){
202       alturas.value <- alturas.value + 3} # Qué hacer SI es TRIPLE SOTANO
203     else {
204       alturas.value <- alturas.value + 0} # Qué hacer SI es OTRA COSA
205     }
206     alturas_Catastro1$ALTURAS[i] <- alturas.value
207   }
208 }
209
210 # 3. GUARDAR NUEVO SHP CON ALTURAS EN NUMERO
211 writeOGR(obj=alturas_Catastro1, dsn="C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/01. Catastro/grafico",
212         layer="CATAST_Join_Output",
213         driver="ESRI Shapefile", overwrite_layer=TRUE)
214

```

Figura 39. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 3

Posteriormente, se genera el ráster unitario para rasterizar el campo Alturas antes creado.

```

225 # 4. CREAR RASTER UNITARIO
226 dummy <- Pamp.flood
227 dummy[] <- 1
228
229 # 5. RASTERIZAMOS EL CAMPO SHP ALTURAS DE LOS EFIDICIOS
230 #RASTERIZAMOS EL SHP DE EDIFICIOS
231 Pamp.alturas.dummy <- rasterize(alturas_Catastro1, dummy, 'ALTURAS')
232

```

Figura 38. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 3

Por último, se ha repartido el valor catastral de Pamplona a lo largo de toda la superficie edificada, teniendo en cuenta como bien se ha mencionado las alturas de los edificios. De este modo a mayor sea la densidad de población de cada zona, mayor será el valor catastral de esas zonas.

```

246 # 8. STOCK
247 # Define stock per capita
248 valor_catastral<-9712373106.49
249 Pamp.valor.correg <- Pamp.alturas.dummy*(valor_catastral/cellStats(Pamp.alturas.dummy, stat='sum', na.rm=TRUE))
250 plot(Pamp.valor.correg)
251
252
253 # 9. GUARDAR EL ARCHIVO .TIFF
254 writeRaster(Pamp.valor.correg, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Valor Catastral/Pamp_valor_Enfoque3.
255

```

Figura 40. Código para la obtención del reparto de los activos residenciales según el enfoque 3



En la figura 41 se muestra de forma gráfica la distribución del valor catastral per cápita de Pamplona. Es evidente que esta representación será más realista que las anteriores ya que tiene en cuenta tanto la localización de los edificios residenciales como sus alturas, esto último no tenido en cuenta por ninguna de los dos enfoques anteriores.

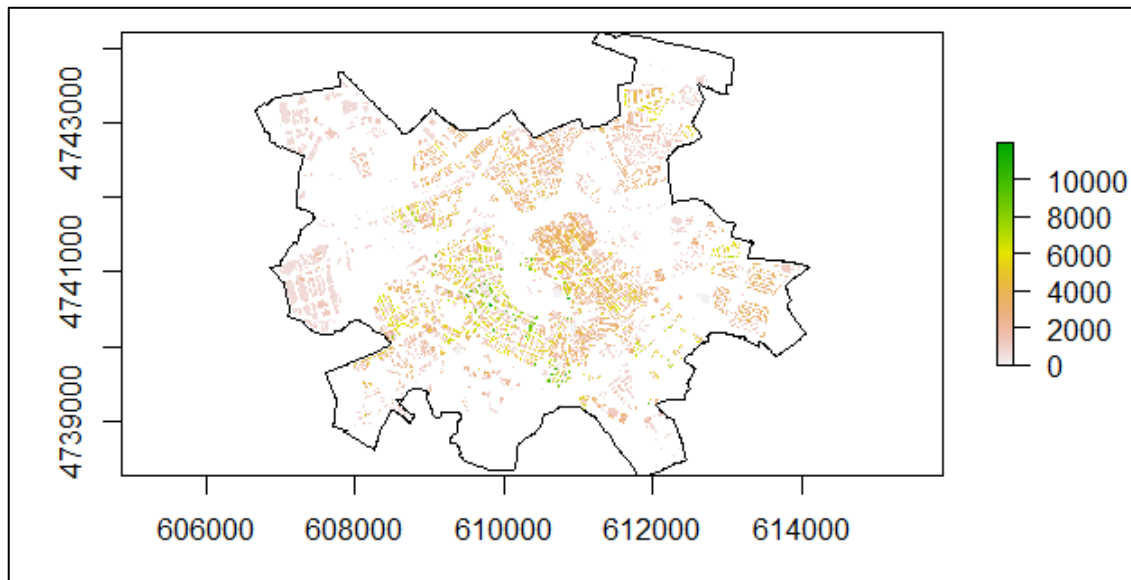


Figura 41. Mapa de representación de los activos residenciales según el enfoque 3



4.3. Caracterización de la vulnerabilidad

Ya se ha mencionado con anterioridad que varios factores son los que afectan a la magnitud del daño por inundación. Estos incluyen extensión de inundación, profundidad de inundación, velocidad de flujo, duración y momento de una inundación. Dichos parámetros se pueden calcular utilizando modelos hidrológicos e hidrodinámicos (véase, por ejemplo, de Moel et al., 2009). Para los daños por inundación, la profundidad de inundación se considera como el parámetro más importante. Es por ello que en el análisis de vulnerabilidad se ha tomado este parámetro como base del análisis.

Es cierto que la inundación puede ocasionar daños indirectos, debido entre otras cosas a la interrupción de sistemas de negocio. Sin embargo, este estudio se enfocará en los daños directos, es decir, la población afectada y los daños en las viviendas.

De manera genérica se puede definir vulnerabilidad como el nivel de daño potencial, es la probabilidad de que se presente cierto nivel de daño, lo cual se obtiene a partir de curvas de fragilidad o de daño, las cuales relacionan la magnitud de la amenaza con el nivel de daño esperado para un determinado elemento expuesto. Este nivel de daño estará asociado con el tipo de sollicitación (carga) que el movimiento transmite al elemento expuesto.

En este caso de estudio, la amenaza a la que se refiere es la inundación y la magnitud de la misma se medirá en términos de profundidad de inundación, pudiéndose obtener así el nivel de daño y por tanto las personas o activos residenciales afectados.

El modo de análisis de daño en las personas y en los activos residenciales será distinto pues, la manera en la que se ven estos afectados difiere mucho. Se aplicará una función más drástica en términos de población, y una gradual para evaluar el daño en los activos residenciales, teniendo en cuenta como se ha mencionado previamente, la cota de inundación a la que estarán expuestos.

4.3.1. Población

En el análisis de la población la condición principal que se ha instaurado se basa en que toda la población situada en lugares donde la profundidad de inundación supere los 0.5m se considerará como población afectada. Por tanto, personas situadas en lugares donde la cota de inundación no alcance este límite, sea inferior a 0.5m, no se considerará que están afectadas por dicha inundación.

Previamente, en el análisis de la exposición se han considerado 3 enfoques distintos y por tanto tres distribuciones de la población distintas. Es por ello que se ha analizado la vulnerabilidad de la población en base a estas distribuciones, obteniendo resultados más precisos en función del nivel de detalle y exactitud de los enfoques.

En la figura 42 que se muestra a continuación se dibuja la función considerada para el análisis de la población. Es esta función la que se ha utilizado en la programación para la obtención de población afectada.

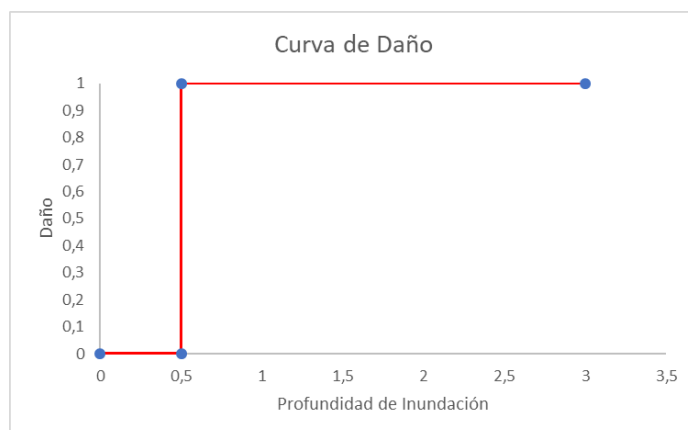


Figura 42. Función de daño para el análisis de la población

La extensión de inundación y la profundidad de inundación generalmente se calculan para un evento de inundación con un período de retorno específico. En este caso, al tratarse de la inundación de una zona urbana cobran gran importancia aquellas inundaciones con bajos periodos de retorno, pues son las que ocurran con mayor asiduidad. Se ha tenido en cuenta lo anterior, pero sobre todo los datos disponibles de la zona, los proporcionados por el CNIG, siendo estos los que proporcionan una mayor exactitud, siendo la resolución de estos de 1m.

Para la realización de esta tarea se ha ejecutado un código con las características que se mostrarán a continuación. Primeramente, consiste en cargar los datos que se han obtenido del análisis de exposición, es decir, la distribución de la población en el municipio de Pamplona. Además, se han cargado las manchas de inundación de los diferentes periodos de retorno que se disponen, T10, T100 y T500. Y por último, se han realizado la intersección estos datos según la curva de daño para obtener las personas afectadas.

```

32
33
34 ##### ENFOQUE 01 #####
35 # 1. CARGAR LA MANCHA DE INUNDACIÓN
36 Pamp.flood.10<-raster("03. Resultados/Manchas inundación/Pamp_Flood_T10.tif")
37
38
39 # 2. CARGAR LA POBLACIÓN
40 Pamp.pop.E1 <- raster("03. Resultados/Población/Pamp_Pob_Enfoque1_T10.tif")
41 Pamp.pop_total <- cellStats(Pamp.pop.E1, stat='sum', na.rm=TRUE)
42
43
44 # 3. APLICAMOS LA FUNCIÓN DE DAÑO
45 Popul.Dam.10.E1 <- Pamp.flood.10
46 Popul.Dam.10.E1 <- crop(Popul.Dam.10.E1, Pamp.pop.E1)
47 Popul.Dam.10.E1[Popul.Dam.10.E1 < 0.5] <- 0
48 Popul.Dam.10.E1[Popul.Dam.10.E1 >= 0.5] <- 1
49
50 Popul.Dam.E10.E1 <- overlay(Popul.Dam.10.E1, Pamp.pop.E1, fun=function(x,y){x*y})
51 Popul.Dam.E10.E1.value <- cellStats(Popul.Dam.E10.E1, stat='sum', na.rm=TRUE)
52
53
54 # 4. SOBRESERIBIMOS LOS RESULTADOS
55 writeRaster(Popul.Dam.E10.E1, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Daño/Pamp_Daño_Enfoque1_T10"
56

```

Figura 43. Código para el análisis de vulnerabilidad de la población

Por tanto, de forma simplificada, tal y como se muestra en la figura 43, los pasos que se ha seguido son los siguientes:

1. Cargar la mancha de inundación del periodo de retorno de estudio
2. Cargar la población correspondiente al enfoque que se esté analizando

3. Aplicar la función de daño, consistiendo esto en crear un ráster que tome el valor de 1 si la cota de inundación es superior a 0.5m y el valor de 0 si dicha cota es inferior a 0.5m como se ha descrito previamente.

Posteriormente se ha realizado la intersección de dicho ráster de ceros y unos con el ráster de población, realizándose dicha intersección como la multiplicación de ambos ráster, obteniendo como resultado la suma de las poblaciones que han sido multiplicadas por 1, es decir aquellas que están sometidas a cotas de inundación superiores a 0.5m, ya que el resto de la población habrá sido multiplicada por 0, es decir, la cota era inferior a 0.5m.

4. Guardar dicha información obtenida para poder evaluar posteriormente el impacto.

Para concluir, y así comprobar que los datos obtenidos son coherentes, en la figura 44 se plasma de forma gráfica, la población afectada para el periodo de retorno T500 y el enfoque 1. El rango de colores que se muestra en la imagen está referido a la densidad de población de esas zonas y por consiguiente a la densidad de población afectada por la inundación.

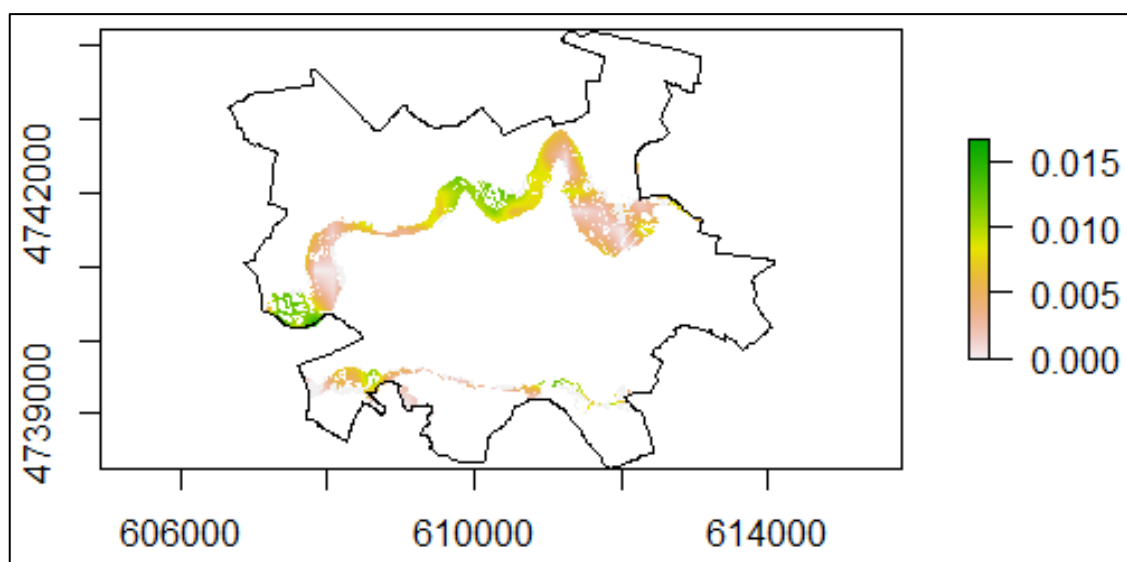


Figura 44. Mapa de población expuesta a riesgo de inundación

Es evidente como ya se ha comentado, que se ha realizado lo mismo, aplicando un código idéntico, combinando enfoques y periodos de retorno.

4.3.2. Activos residenciales

El criterio utilizado para la evaluación de los activos residenciales afectados es ciertamente, algo más complejos, pues el nivel de daño en cada uno de los edificios es proporcional a la altura de la mancha de inundación en cada punto, por lo que en este caso la evaluación será gradual que lo que lo fue en el análisis de la vulnerabilidad de la población.

Como se muestra en la figura siguiente, se ha dividido el nivel de daño al que se exponen los edificios en función de la altura de inundación a la que estén expuestos, obteniendo, por tanto,

mayores niveles de daño, a mayor sea la cota de inundación, observándose el mayor nivel de daño, 1, cuando la cota de inundación supera los 6 metros de altura.

| Europa | |
|---------------------|------|
| Cota inundación (m) | Daño |
| 1 | 0,4 |
| 2 | 0,65 |
| 3 | 0,75 |
| 4 | 0,85 |
| 5 | 0,95 |
| 6 | 1 |

Tabla 10. Tabla de nivel de riesgo en función de la cota de inundación

Estos datos se han obtenido en base a un estudio realizado por la Unión Europea en 2017, el cual proporciona las funciones de daño ante riesgo de inundación. Se han utilizado los datos generales obtenidos para Europa pues no se dispone de una función de riesgo particular para España, como se muestra en la figura 45.

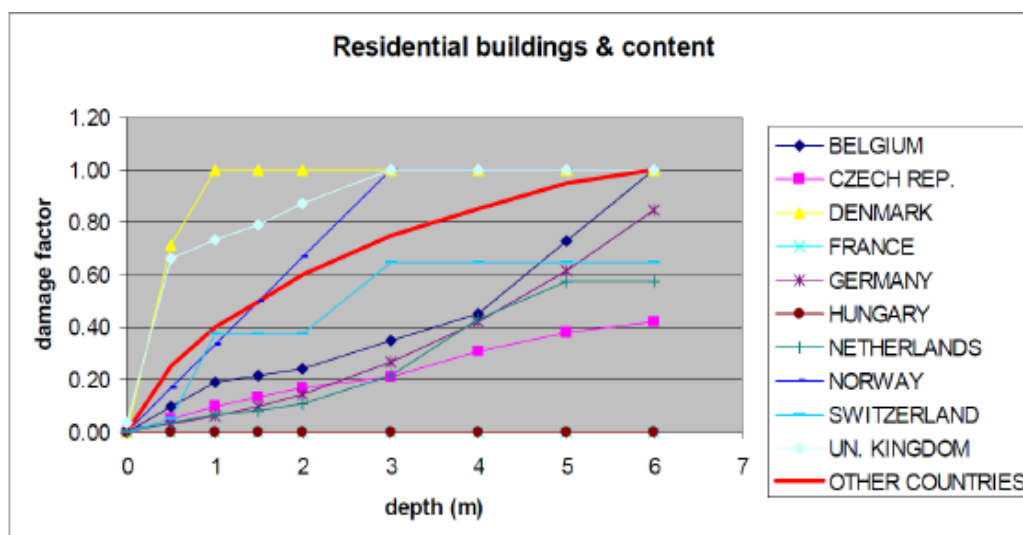


Figura 45. Función de daño asociada a los activos residenciales.

Utilizando toda esta información disponible, se ha dividido la curva por tramos obteniéndose una representación equivalente a la que observaba en la figura xx, en este caso se ha representado mediante tramos rectos que posteriormente se han utilizado para programar la función de daño.

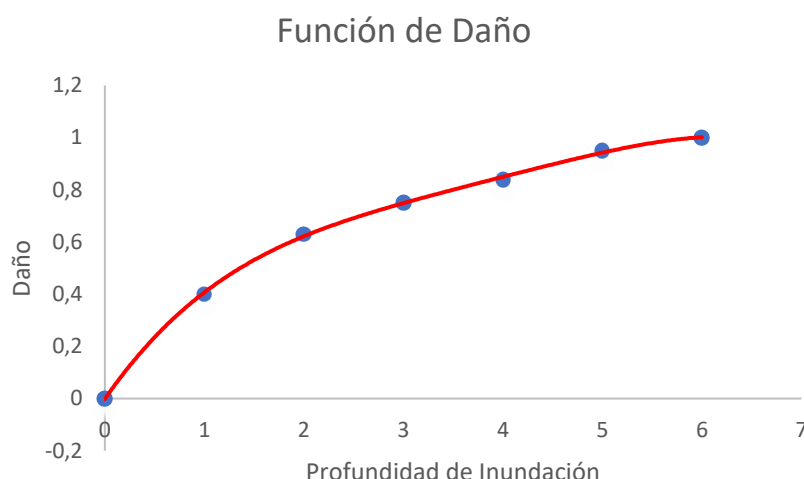


Figura 46. Función de daño utilizada para el análisis de los activos residenciales

Previamente, en el análisis de la exposición se han considerado 3 enfoques distintos y por tanto tres distribuciones de activos residenciales diferentes. Es por ello que se ha analizado la vulnerabilidad de dichos activos residenciales en base a estas distribuciones, obteniendo resultados más precisos en función del nivel de detalle y exactitud de los enfoques.

Los pasos a seguir son similares a los que se ejecutaron a la hora de evaluar la población. Primeramente, se ha cargado tanto la mancha de inundación como el enfoque correspondiente, teniendo en cuenta que hay tres manchas de inundación correspondientes a cada periodo de retorno, y un total de tres enfoques para repartir los activos residenciales en el municipio de Pamplona, lo cual hace un total de 9 combinaciones posibles a la hora de obtener el daño residencial.

```

61 #VALOR CATASTRAL
62
63 # 1. CARGAR LA MANCHA DE INUNDACIÓN
64 Pamp.flood.10<-raster("03. Resultados/Manchas inundación/Pamp_Flood_T10.tif")
65
66 # 2. CARGAR LA POBLACIÓN
67 Pamp.valor.E1 <- raster("03. Resultados/Valor Catastral/Pamp_valor_Enfoque1_T10.tif")
68 Pamp.valor_total <- cellStats(Pamp.valor.E1, stat='sum', na.rm=TRUE)
69

```

Figura 47. Código para el análisis de vulnerabilidad de los activos residenciales

Posteriormente se ha procedido a aplicar la función de daño. Esto se muestra en la figura 48, donde se puede comprobar que se ha dividido la función de 5 tramos diferentes, los cuales se muestran tanto en la tabla que se muestra a continuación como en gráfica que se ha mostrado anteriormente en la figura 46.

| Cota Inundación (m) | Función de daño |
|---------------------|----------------------|
| [0,1] | $y = 0,4x$ |
| [1,3] | $y = 0,175x + 0,243$ |
| [3,5] | $y = 0,1x + 0,446$ |
| [5,6] | $y = 0,05x + 0,7$ |
| [6,∞) | 1 |

Tabla 11. División de la curva de daño por tramos

Por tanto, en el código se disponen 5 bloque de código similares en los que se utiliza el mismo criterio, consistente en dotarle un valor en base a la función que corresponda, a los valores que se encuentren dentro del rango de valores correspondiente, y atribuyendo el valor 0 a aquellos que se encuentran fuera del mismo. Es decir, particularizando para el primero de los casos, asigna el valor 0 a aquellas cotas de inundación inferiores a 0 y superiores a 1, al resto de valores que se encuentren dentro de ese rango, les atribuye un valor proporcionado por la función $y = 0,4x$. Cada bloque atribuye valores a intervalo correspondiente, generando así 5 ráster diferentes.

```

71 # 3. APLICAMOS LA FUNCIÓN DE DAÑO
72 valor.Dam.01 <- Pamp.flood.10
73 valor.Dam.01 <- crop(valor.Dam.01, Pamp.valor.E1)
74 valor.Dam.01[valor.Dam.01 < 0.001] <- 0
75 valor.Dam.01[valor.Dam.01 >= 1] <- 0
76 valor.Dam.01 <- overlay(valor.Dam.01, fun=function(x){x[x >= 0.001]; return(0.4*x)})
77
78
79 valor.Dam.02 <- Pamp.flood.10
80 valor.Dam.02 <- crop(valor.Dam.02, Pamp.valor.E1)
81 valor.Dam.02[valor.Dam.02 < 1] <- 0
82 valor.Dam.02[valor.Dam.02 >= 3] <- 0
83 valor.Dam.02 <- overlay(valor.Dam.02, fun=function(x){x[x >= 1]; return(0.175*x+0.25)})
84
85
86 valor.Dam.03 <- Pamp.flood.10
87 valor.Dam.03 <- crop(valor.Dam.03, Pamp.valor.E1)
88 valor.Dam.03[valor.Dam.03 < 3] <- 0
89 valor.Dam.03[valor.Dam.03 >= 5] <- 0
90 valor.Dam.03 <- overlay(valor.Dam.03, fun=function(x){x[x >= 3]; return(0.1*x+0.44)})
91
92
93 valor.Dam.04 <- Pamp.flood.10
94 valor.Dam.04 <- crop(valor.Dam.04, Pamp.valor.E1)
95 valor.Dam.04[valor.Dam.04 < 5] <- 0
96 valor.Dam.04[valor.Dam.04 >= 6] <- 0
97 valor.Dam.04 <- overlay(valor.Dam.04, fun=function(x){x[x >= 5]; return(0.05*x+0.7)})
98
99
100 valor.Dam.05 <- Pamp.flood.10
101 valor.Dam.05 <- crop(valor.Dam.05, Pamp.valor.E1)
102 valor.Dam.05[valor.Dam.05 < 6] <- 0
103 valor.Dam.05[valor.Dam.05 >= 6] <- 1
104

```

Figura 48. Código para la obtención del daño en activos residenciales

Posteriormente realiza la intersección de la superficie que representa la distribución de los activos residenciales, con los diferentes tramos de la función de daño, obteniendo 5 ráster solución con los activos residenciales afectados.

```

105
106 Valor.Dam.E1.01 <- overlay(Valor.Dam.01, Pamp.valor.E1, fun=function(x,y){x*y})
107 Valor.Dam.E1.02 <- overlay(Valor.Dam.02, Pamp.valor.E1, fun=function(x,y){x*y})
108 Valor.Dam.E1.03 <- overlay(Valor.Dam.03, Pamp.valor.E1, fun=function(x,y){x*y})
109 Valor.Dam.E1.04 <- overlay(Valor.Dam.04, Pamp.valor.E1, fun=function(x,y){x*y})
110 Valor.Dam.E1.05 <- overlay(Valor.Dam.05, Pamp.valor.E1, fun=function(x,y){x*y})
111 Valor.Dam.E1 <- overlay(Valor.Dam.E1.01,
112                        Valor.Dam.E1.02,
113                        Valor.Dam.E1.03,
114                        Valor.Dam.E1.04,
115                        Valor.Dam.E1.05, fun=function(x,y,z,t,s){x+y+z+t+s})
116 Valor.Dam.E1.value <- cellStats(Valor.Dam.E1, stat='sum', na.rm=TRUE)
117
118
119 # 4. SOBRESERIBIMOS LOS RESULTADOS
120 writeRaster(Valor.Dam.E1, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Daño/Pamp_DañoCatastral_Enfoque1_T10"
121

```

Figura 49. Código para la obtención del daño en activos residenciales

Por último, se unifican todos ellos en un único ráster que se almacena para más adelante poder evaluar el riesgo de inundación de dichos activos.

En la figura 50 que se muestra a continuación, se representa un ejemplo de los activos residenciales afectados por riesgo de inundación debidos a una inundación con periodo de retorno de 100 años y según en enfoque 1. El rango de colores de la leyenda indica la cuantía de activos residenciales afectados en cada zona por la inundación.

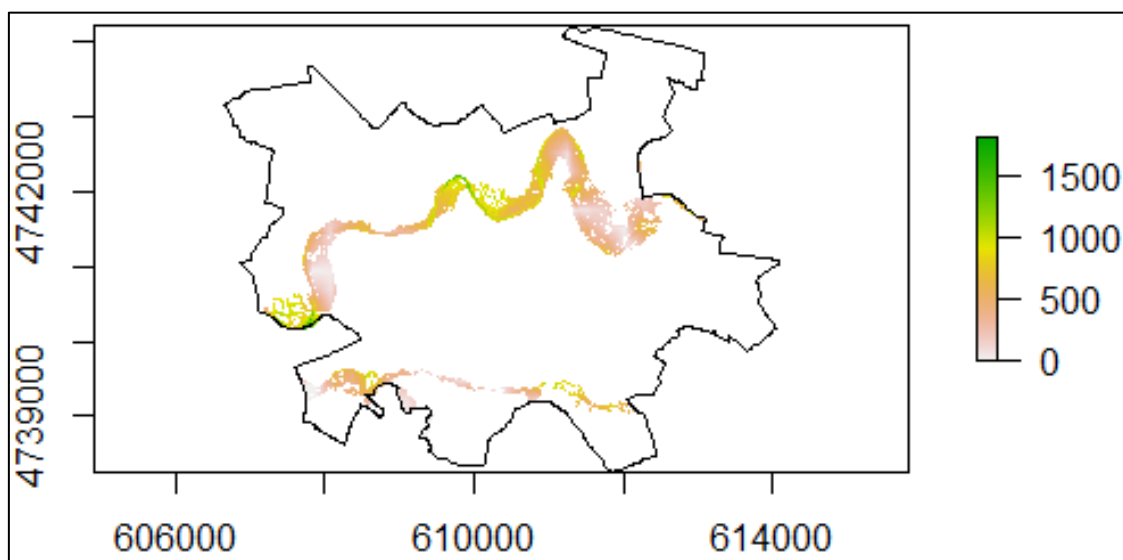


Figura 50. Mapa de activos residenciales afectados

5. Resultados del análisis de riesgo

Una vez realizado en análisis tanto de exposición como de vulnerabilidad se ha procedido a realizar un análisis de riesgo en base a los diferentes enfoques que se han ido describiendo en los capítulos anteriores, tanto de exposición como de vulnerabilidad.

También se ha descrito en capítulos anteriores el riesgo de inundación como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de inundaciones con las consecuencias asociadas a dicha situación. Este riesgo evoluciona de manera dinámica en el tiempo, es por ello que habrá que tenerlo en cuenta para el análisis.

5.1. Riesgo sobre la población

En capítulos anteriores se ha obtenido tanto la distribución de la población según 3 enfoques diferente como los mapas de peligrosidad de inundación de la ciudad de Pamplona. Con estos dos datos se pretende obtener la cantidad de población que se va a ver afectada por este tipo de eventos.

Para la evaluación de riesgo sobre cada uno de los tres enfoques se ha optado por analizar el daño que producirían cada uno de los tres periodos de retorno anteriormente mencionados en función del enfoque que se lleve a cabo, pudiéndose así comprobar las diferencias entre cada uno de ellos, y, por ende, la mejoría que se obtiene en los resultados obtenidos.

Una vez obtenidos dichos daños, se pretende llegar a obtener el daño anual esperado (DAE) para cada uno de los enfoques, de tal modo que podamos llegar a estimar que número de personas estaría afectado por dichas inundaciones en un año, pudiendo llegar a observar a si la severidad del evento.

Ya se ha descrito previamente que el daño anual esperado se va a obtener de dos formas distintas. Se obtendrá por un lado de forma analítica como la integración de la curva de densidad de riesgo de inundación sobre todas las probabilidades, y por otro lado, de forma numérica como la suma de trapecios bajo la curva de daño.

| Integración numérica | Solución analítica |
|---|--|
| $DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1})$ | $DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right)$ |

Figura 51. Ecuaciones para la obtención del DAE

5.1.1. Enfoque 1

El primero de los enfoques hace referencia a aquel que distribuye la población según lo estipulado por el Global Human Settlement Layer, el cual como bien se ha descrito previamente, proporciona datos con una resolución de 250m, es decir, es el enfoque menos preciso de los tres que se han planteado.

Partiendo de los datos de población, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido las personas afectadas para cada periodo de

retorno. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de personas afectadas.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran las personas afectadas por cada uno de los tres eventos estudiando, los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, la cantidad de personas afectadas es mayor en el periodo de retorno de los 500 años, pues se trata del evento de inundación que tiene una probabilidad de ocurrencia de 1/500, es decir, que tiene una probabilidad de ocurrir de una vez cada 500 años, y por tanto es el más extremos de los tres.

| T. Retorno | Personas Afectadas |
|------------|--------------------|
| 10 | 4.775 |
| 100 | 10.354 |
| 500 | 14.270 |

Tabla 12. Personas afectadas por riesgo de inundación en base al enfoque 1

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado, DAE. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Dicha gráfica se muestra en la figura 52.

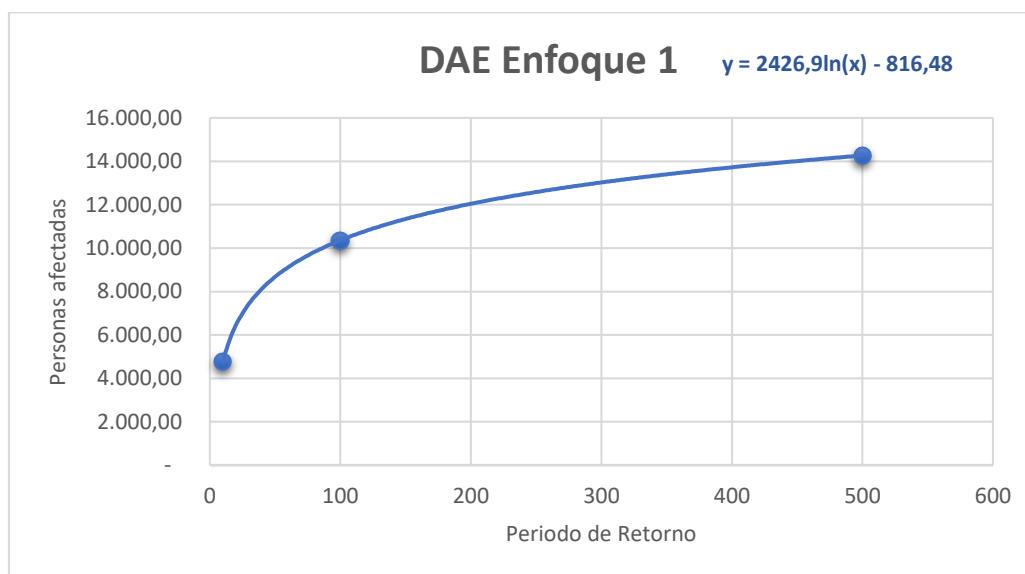


Figura 52. DAE de personas afectadas en base al enfoque 1

El DAE o daño anual esperado, se obtiene como el área bajo dicha curva. Como bien se ha comentado, dicho área se ha obtenido a partir de dos métodos diferentes. El primero de ellos consiste en un método numérico, basado en la suma de trapecios tomando como vértices los puntos conocidos. Por tanto, la expresión tiene la siguiente forma:

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$



$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (4.775 + 10.354) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (10.354 + 14.270) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 780 \text{ personas}}$$

El método analítico es la segunda de las formas para obtener el área bajo la curva, es decir, asemeja la curva a una función de daño, una función logarítmica que pase por los tres puntos conocidos. Dicha función logarítmica es la que se muestra continuación:

$$\text{Función de daño: } y = a + b * \ln(p)$$

$$y = 2426,9 \ln(x) - 816,48$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 2426,9 * e^{\frac{-816,48}{2426,9}} \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 1.734 \text{ personas}}$$

Por tanto, los resultados obtenidos del enfoque 1 se podrían resumir en la siguiente tabla:

| T. Retorno | Población afectada |
|----------------------|--------------------|
| DAE analítico | 1.734 |
| DAE numérico | 780 |

Tabla 13. Resumen resultados del DAE

5.1.1. Enfoque 2

En el segundo enfoque se ha distribuido la población en base a la superficie edificada proporcionada del catastro de Gobierno de Navarra. De este modo se obtiene una distribución de la población más próxima a la realidad que lo descrito en el enfoque anterior. El análisis de la población para dicho enfoque se ha descrito previamente en capítulo de exposición.

Partiendo de los datos de población, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido las personas afectadas para cada periodo de retorno. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de personas afectadas según este segundo enfoque.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran las personas afectadas por cada uno de los tres eventos estudiando, los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, al igual que lo que ocurría en el primer enfoque, la cantidad de personas afectadas es mayor en el periodo de retorno de los 500 años por ser el más extremo.

| T. Retorno | Personas Afectadas |
|------------|--------------------|
| 10 | 77 |
| 100 | 632 |
| 500 | 1.364 |

Tabla 14. Personas afectadas por riesgo de inundación en base al enfoque 2

El número de personas afectadas según este enfoque es inferior a los resultados obtenidos según el enfoque 1, pues como se describió en el capítulo de exposición, la mancha de inundación proporcionada por Global Human Settlement Layer ubica una densidad de población superior a 0 en lugares donde ni siquiera hay edificación, lo cual hace que los resultados obtenidos mediante el primer enfoque sean menos precisos.

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado, DAE. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Dicha gráfica se muestra en la figura 53.

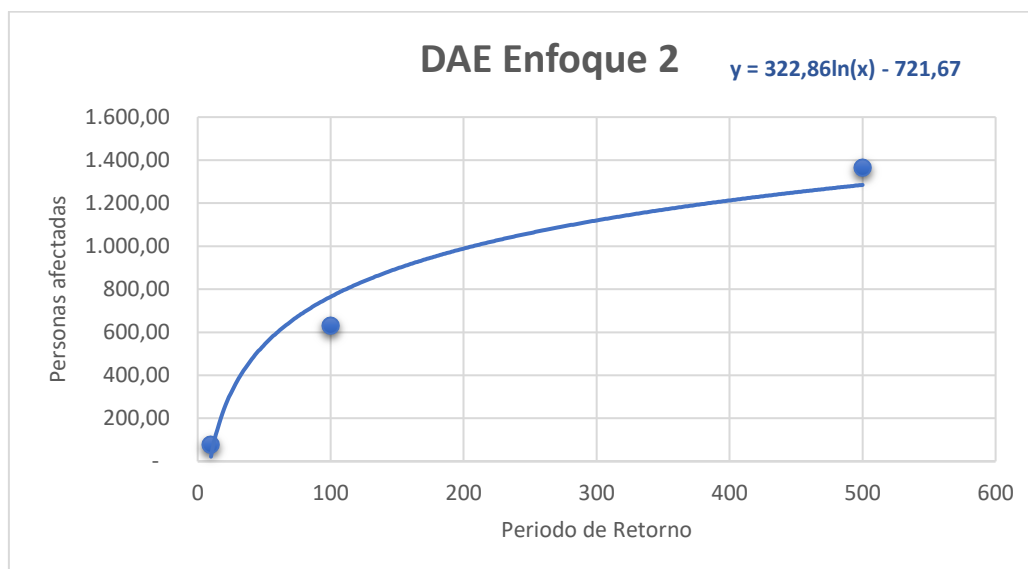


Figura 53. DAE de personas afectadas en base al enfoque 2

El DAE o daño anual esperado, se obtiene como el área bajo dicha curva. Del primero de los métodos, el numérico, se obtienen los siguientes resultados.

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (77 + 632) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (632 + 1.364) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 40 \text{ personas}}$$

Utilizando ahora un método analítico para obtener el DAE, a partir de la función de daño como se ha descrito previamente:

$$\text{Función de daño: } y = a + b * \ln(p)$$

$$y = 322,86 \ln(x) - 721,67$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:



$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 322,86 * e^{\frac{-721,67}{322,86}} \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 35 \text{ personas}}$$

Por tanto, los resultados obtenidos del enfoque 2 se podrían resumir en la siguiente tabla:

| T. Retorno | Población afectada |
|---------------|--------------------|
| DAE analítico | 35 |
| DAE numérico | 40 |

Tabla 15. Resumen resultados del DAE

5.1.2. Enfoque 3

En el último enfoque se ha distribuido la población teniendo en cuenta la superficie edificada y las alturas de los edificios ubicados en dichas superficies, todo ello proporcionado por el catastro del Gobierno de Navarra, siendo ésta por tanto, la más precisa de las distribuciones de población que se han descrito.

Partiendo de los datos de población, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido las personas afectadas para cada periodo de retorno. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de personas afectadas según este tercer enfoque.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran las personas afectadas por cada uno de los tres eventos, estudiando los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, al igual que lo que ocurría en los anteriores enfoques, la cantidad de personas afectadas es mayor en el periodo de retorno de los 500 años por ser el más extremo.

| T. Retorno | Personas Afectadas |
|------------|--------------------|
| 10 | 25 |
| 100 | 298 |
| 500 | 577 |

Tabla 16. Personas afectadas por riesgo de inundación en base al enfoque 3

El número de personas afectadas según este enfoque es inferior a todos los anteriores anteriormente obtenidos, pues este es el método que mayor precisión garantiza por tener en cuenta las alturas de los edificios residenciales, y con ello la densidad de población en cada uno de ellos.

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado, DAE. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Dicha gráfica se muestra en la **figura xx**.

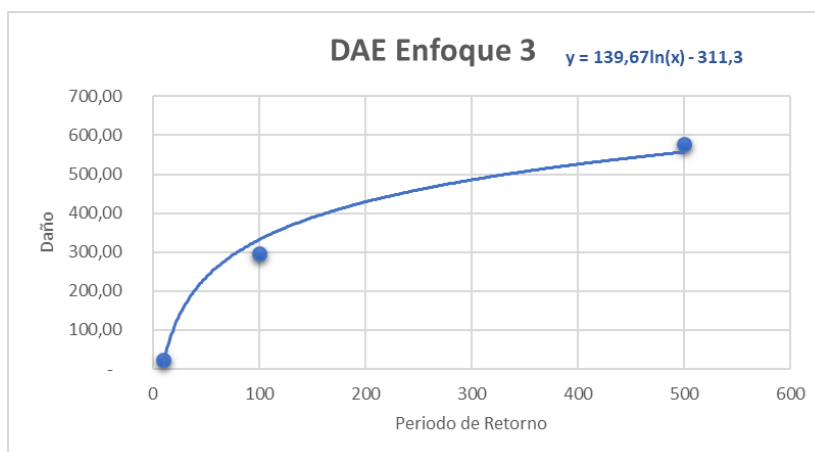


Figura 54. DAE de población en base al enfoque 3

El DAE o daño anual esperado, se obtiene como el área bajo dicha curva. Del primero de los métodos, el numérico, se obtienen los siguientes resultados.

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (25 + 298) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (298 + 577) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 18 \text{ personas}}$$

Utilizando ahora un método analítico para obtener el DAE, a partir de la función de daño como se ha descrito previamente:

$$\text{Función de daño: } y = a + b * \ln(p)$$

$$y = 139,67 \ln(x) - 311,3$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 139,67 * e^{\frac{-311,3}{139,67}} \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 15 \text{ personas}}$$

Por tanto, los resultados obtenidos del enfoque 2 se podrían resumir en la siguiente tabla:

| T. Retorno | Población afectada |
|---------------|--------------------|
| DAE analítico | 15 |
| DAE numérico | 18 |

Tabla 17. Resumen resultados del DAE

5.1.3. Análisis de diferencias

En la tabla 18 que se muestra a continuación, se resumen todos los resultados del análisis de riesgo de población obtenidos según los enfoques descritos previamente. Se muestran las

personas afectadas por riesgo de inundación según un enfoque y un periodo de retorno determinado.

| T. Retorno / Enfoque | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 10 | 4.775 | 77 | 25 |
| 100 | 10.354 | 632 | 298 |
| 500 | 14.270 | 1.364 | 577 |
| DAE analítico | 1.734 | 35 | 15 |
| DAE numérico | 780 | 40 | 18 |

Tabla 18. Resumen de resultados obtenidos de análisis de vulnerabilidad

Analizando previamente el daño obtenido por cada uno de los enfoques según el periodo de retorno considerado, se observa una amplia variación entre los resultados obtenidos en el enfoque 1 y los obtenidos en los otros dos enfoques, justificado por la falta de precisión del enfoque 1.

De dichos resultados se puede concluir que el análisis de riesgo mejora de manera superlativa a medida que mejoramos la precisión de los datos de exposición, siendo por tanto los datos más precisos los obtenidos en el enfoque 3.

En la imagen que se muestra a continuación se pretende expresar de forma más gráfica la idea expuesta previamente. Se ha plasmado la superficie edificada sobre la distribución de población propuesta por el enfoque 1. Se observa claramente las diferencias entre enfoques. Con ello se quiere mostrar, que la distribución de población proporcionada por el primer enfoque sitúa gente en lugares donde no está edificado e incluso llega a situar población en el cauce de río, lo cual es imposible. Esto se debe a la baja resolución de los datos obtenidos según el Global Human Settlement Layer.

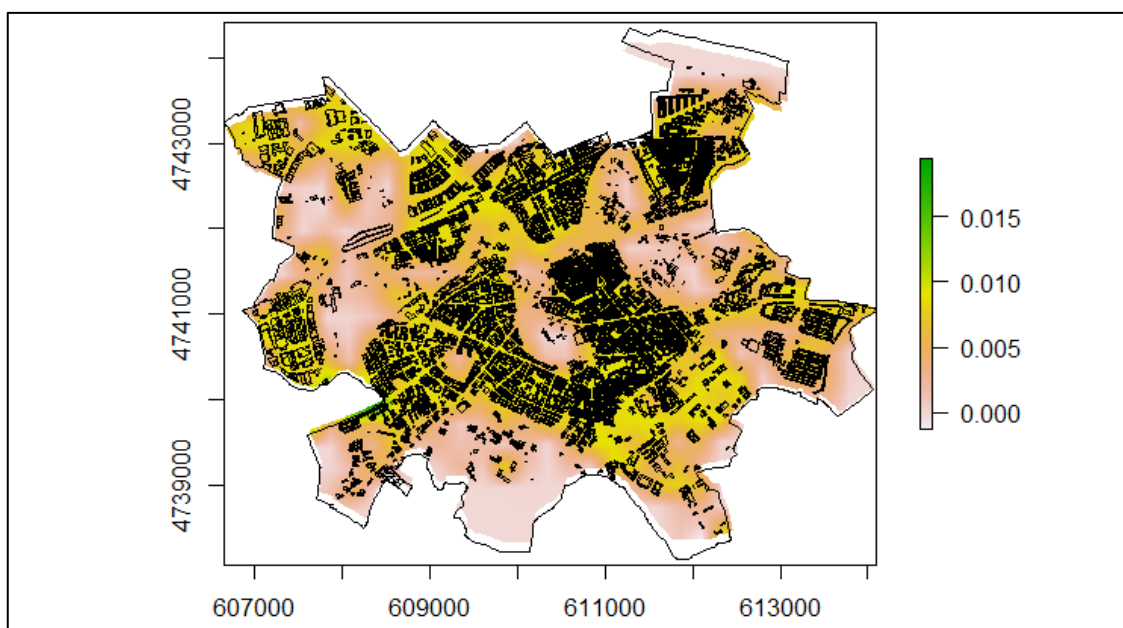


Figura 55. Mapa resumen de las diferencias entre los diferentes enfoques



Con respecto a la diferencia entre los enfoques 2 y 3, es debida obviamente a la información extra utilizada en el tercer enfoque, haciendo uso de las alturas de los edificios. Esto genera una variación en los resultados, pero no tan evidente como la que se ha visto entre el enfoque 1 y 2. La distribución de la población según superficie y altura de los edificios es importante, pero la diferencia no es tan notoria ya que la diferencia de alturas entre los edificios no es muy grande, siendo una ciudad de casi 200.000 habitantes donde la distribución de la población es más o menos homogénea.

En la tabla que se muestra a continuación se expresa la diferencia entre los datos analizados de forma numérica. Se ha tomado como unidad los resultados obtenidos en el enfoque 3 por ser éste el más preciso. Se aprecia una diferencia próxima a 200 unidades entre el enfoque 1 y el enfoque 3 lo cual es una variación muy apreciable, y demuestra la evolución del nivel de daño en función de la precisión en el análisis de la exposición.

| T. Retorno | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| 10 | 194,95 | 3,13 | 1,00 |
| 100 | 34,81 | 2,12 | 1,00 |
| 500 | 24,73 | 2,36 | 1,00 |

Tabla 19. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques

Lo mismo ocurre con los resultados obtenidos del DAE. Siendo esto un resultado obtenido a partir de la combinación de datos según los tres periodos de retorno se podría tomar estas variaciones como resumen de las diferencias entre el análisis de riesgo según cada uno de los enfoques, haciendo ver en dichos valores la considerable mejoría obtenida al mejorar el análisis de exposición.

| | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| DAE analítico | 115,34 | 2,30 | 1,00 |
| DAE numérico | 43,33 | 2,22 | 1,00 |

Tabla 20. Tabla comparación de resultados de DAE entre enfoques

Se aprecia por tanto una variación próxima a 115 puntos entre el primer enfoque y el tercer enfoque, el más preciso.

Analizando ahora las diferencias obtenidas entre la obtención de DAE según dos métodos diferentes, en principio, los dos métodos deberían arrojar resultados similares bajo el supuesto de que la relación log-lineal postulada es razonable. Sin embargo, la cantidad de cálculos de riesgo requeridos difiere sustancialmente, lo cual significa que el método analítico proporciona un resultado más exacto.

| | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| DAE analítico | 1.734 | 35 | 15 |
| DAE numérico | 780 | 40 | 18 |

Tabla 21. Resumen DAE según enfoques

Esto se debe principalmente a que el modo de calcular el área bajo la curva a partir del cálculo de la integral de la función que la define es más preciso que el cálculo del área mediante



la suma de áreas de trapecios que se asemejen al área bajo la curva. Por ello, los resultados, aunque ambos dos sean fiables, los obtenidos mediante el método analítico son más precisos.

Como se observa en la tabla 22, las variaciones entre dichos métodos se hace más notables en el enfoque 1 ya que las diferencias de población afectada obtenidas entre los distintos periodos de retorno, son mayores en este primero enfoque, siendo considerablemente inferiores en los otros dos, gracias a una mejor distribución de la población.

Se observa por tanto que las variaciones observadas entre los dos métodos en los enfoques dos y tres son similares, dado que la población afectada en los distintos periodos de retorno es similar, y la precisión de estos dos métodos no difiere tanto como en lo correspondiente al enfoque 1.

| | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Variación | 55,1% | -15,4% | -19,7% |

Tabla 22. Resumen de resultados DAE obtenidos

5.2. Riesgo sobre los activos residenciales

En capítulos anteriores se ha obtenido la distribución de los activos residenciales según 3 enfoques diferentes, así como los mapas de peligrosidad de inundación de la ciudad de Pamplona. Con estos dos datos se pretende obtener los activos residenciales por este tipo de eventos. De este modo se podrá calcular en términos económicos los daños producidos directamente por la presencia de inundaciones en Pamplona.

Para la evaluación de riesgo sobre cada uno de los tres enfoques se ha optado por analizar el daño que producirían cada uno de los tres periodos de retorno anteriormente mencionados en función del enfoque que se lleve a cabo, pudiéndose así comprobar las diferencias entre cada uno de ellos, y, por ende, la mejoría que se obtiene en los resultados obtenidos al utilizar distribuciones de activos residenciales más exactas.

Con se indicó en el análisis de vulnerabilidad, para evaluar los activos afectados se utilizó una función de daño en la que, según la altura de inundación, los daños los daños generados en dichos activos eran de mayor o menor envergadura. En base a ello, se ha realizado un análisis de riesgo de los mismos.

Una vez obtenidos dichos daños, se pretende llegar a obtener el daño anual esperado (DAE) para cada uno de los enfoques, de tal modo que podamos llegar a estimar qué número de activos estaría afectado por dichas inundaciones en un año, obteniendo así la severidad del evento.

Ya se ha descrito previamente en el análisis de población que el daño anual esperado se va a obtener de dos formas distintas. Se obtendrá por un lado de forma analítica como la integración de la curva de densidad de riesgo de inundación sobre todas las probabilidades, y por otro lado, de forma numérica como la suma de trapecios bajo la curva de daño.

| Integración numérica | Solución analítica |
|---|--|
| $DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1})$ | $DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right)$ |

Tabla 23. Ecuaciones para la obtención del DAE

5.2.1. Enfoque 1

El primero de los enfoques hace referencia a aquel que distribuye los activos residenciales de forma proporcional a como el Global Human Settlement Layer distribuye la población en la superficie de la ciudad de Pamplona. Dichos datos tienen una resolución de 250m, es decir, es el enfoque menos preciso de los tres que se han planteado.

Partiendo de estos activos residenciales, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido los activos afectados para cada periodo de retorno. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de activos afectados.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los activos afectados por cada uno de los tres eventos estudiando, los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, la cantidad de personas afectadas es mayor en el periodo de retorno de

los 500 años, pues se trata del evento de inundación que tiene una probabilidad de ocurrencia de 1/500, es decir, que tiene una probabilidad de ocurrir de una vez cada 500 años, y por tanto es el más extremos de los tres.

| T. Retorno | Activos afectados |
|------------|--------------------|
| 10 | 484.859.221,46 € |
| 100 | 1.227.499.834,69 € |
| 500 | 1.510.269.537,85 € |

Tabla 24. Activos afectados en base al enfoque 1

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado, DAE. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Dicha gráfica se muestra en la figura 56.

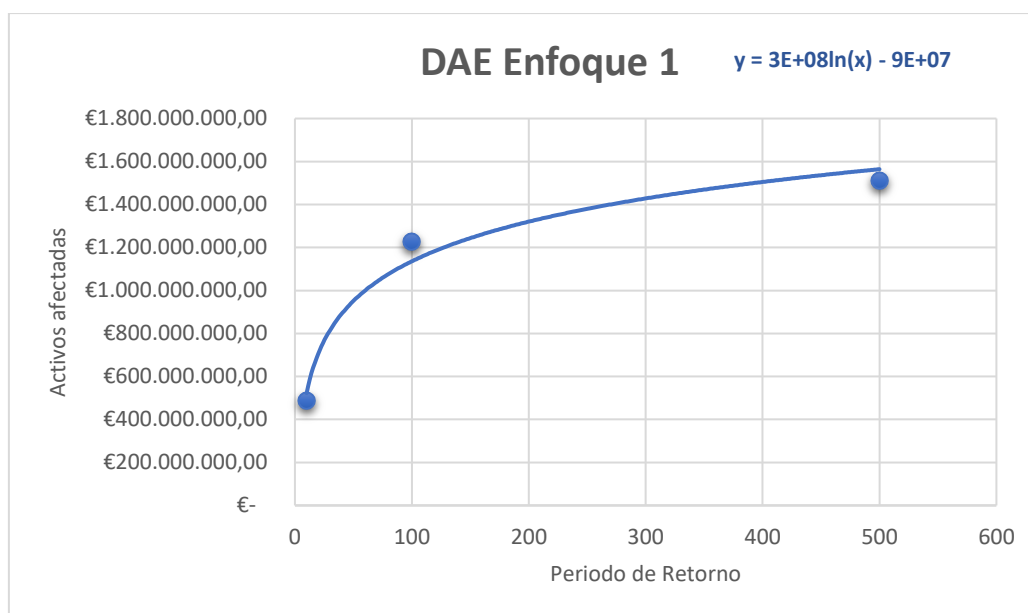


Figura 56. Representación del DAE en base al enfoque 1

El DAE o daño anual esperado, se obtiene como el área bajo dicha curva. Como bien se ha comentado, dicha área se ha obtenido a partir de dos métodos diferentes. El primero de ellos consiste en un método numérico, basado en la suma de trapecios tomando como vértices los puntos conocidos. Por tanto, la expresión tiene la siguiente forma:

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (484.859.221,46 + 1.227.499.834,69) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (1.227.499.834,69 + 1.510.269.537,85) \right] \rightarrow$$



$$DAE = 88.007.235,02 \text{ €}$$

El método analítico es la segunda de las formas para obtener el área bajo la curva, es decir, asemeja la curva a una función de daño, una función logarítmica que pase por los tres puntos conocidos. Dicha función logarítmica es la que se muestra continuación:

$$\text{Función de daño: } y = a + b * \ln(p)$$

$$y = 3 * 10^8 \ln(x) - 9 * 10^7$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 3 * 10^8 * e^{\frac{-9*10^7}{3*10^8}} \rightarrow$$

$$DAE = 222.245.456,20 \text{ €}$$

Por tanto, los resultados obtenidos del enfoque 1 se podrían resumir en la siguiente tabla:

| T. Retorno | Activos afectados |
|---------------|-------------------|
| DAE analítico | 222.245.456,20 € |
| DAE numérico | 88.007.235,02 € |

Tabla 25. Resumen de resultados DAE en base al enfoque 1

5.2.2. Enfoque 2

En el segundo enfoque se han distribuido los activos residenciales en base a la superficie edificada proporcionada del catastro de Gobierno de Navarra. De este modo se obtiene una distribución más próxima a la realidad que lo descrito en el enfoque anterior. El análisis de los activos residenciales para dicho enfoque se ha descrito previamente en capítulo de exposición.

Partiendo de la distribución de activos, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido los activos para cada periodo de retorno. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos según este segundo enfoque.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los activos afectados por cada uno de los tres eventos, estudiando los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, al igual que lo que ocurría en el primer enfoque, la cantidad de activos afectados es mayor en el periodo de retorno de los 500 años por ser el más extremo.

| T. Retorno | Activos afectados |
|------------|-------------------|
| 10 | 13.682.728,37 € |
| 100 | 109.778.102,77 € |
| 500 | 150.632.187,15 € |

Tabla 26. Activos afectados en base al enfoque 2

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado, DAE. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Dicha gráfica se muestra en la figura 57.

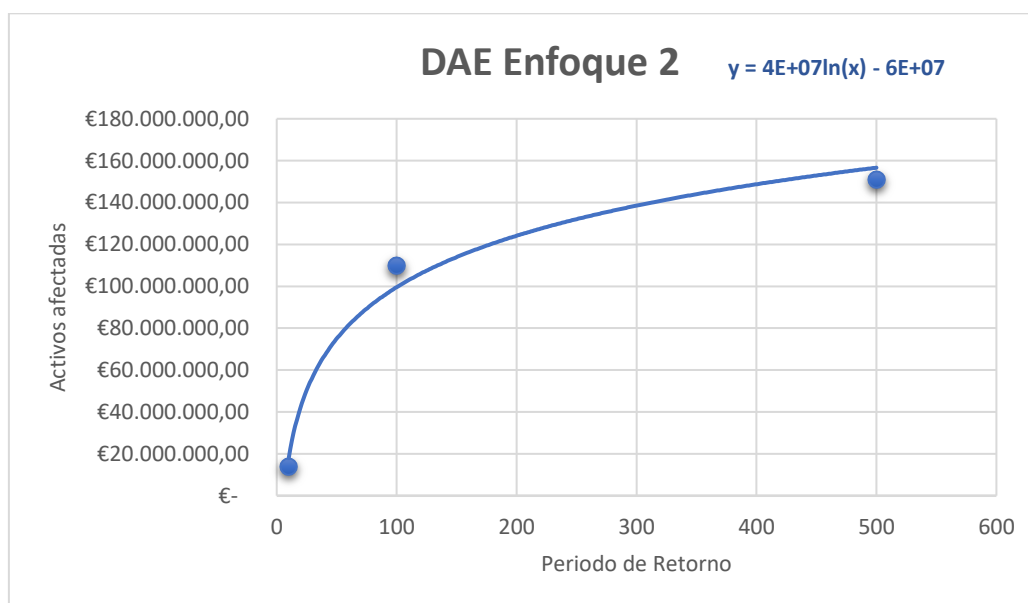


Figura 57. Representación del DAE en base al enfoque 2

El DAE o daño anual esperado, se obtiene como el área bajo dicha curva. Como bien se ha comentado, dicha área se ha obtenido a partir de dos métodos diferentes. El primero de ellos consiste en un método numérico, basado en la suma de trapecios tomando como vértices los puntos conocidos. Por tanto, la expresión tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 DAE &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) = \\
 &= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (13.682.728,37 + 109.778.102,77) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) \right. \\
 &\quad \left. * (109.778.102,77 + 150.632.187,15) \right] \rightarrow \\
 &\quad \underline{\underline{DAE = 6.597.378,56€}}
 \end{aligned}$$

El método analítico es la segunda de las formas para obtener el área bajo la curva, es decir, asemeja la curva a una función de daño, una función logarítmica que pase por los tres puntos conocidos. Dicha función logarítmica es la que se muestra continuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Función de daño: } y &= a + b * \ln(p) \\
 y &= 4 * 10^7 \ln(x) - 6 * 10^7
 \end{aligned}$$



Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 4 * 10^7 * e^{\frac{-6*10^7}{4*10^7}} \rightarrow$$

$$DAE = 8.925.206,41 \text{ €}$$

Por tanto, los resultados obtenidos del enfoque 2 se podrían resumir en la siguiente tabla:

| T. Retorno | Activos afectados |
|---------------|-------------------|
| DAE analítico | 8.925.206,41 € |
| DAE numérico | 6.597.378,56 € |

Tabla 27 Resumen de resultados DAE en base al enfoque 2.

5.2.3. Enfoque 3

En el último enfoque se ha distribuido los activos residenciales teniendo en cuenta la superficie edificada y las alturas de los edificios ubicados en dichas superficies, todo ello proporcionado por el catastro del Gobierno de Navarra, siendo ésta por tanto, la más precisa de las distribuciones de activos que se han descrito.

Partiendo de los activos residenciales, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido los activos afectados para cada periodo de retorno. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de activos afectadas según este tercer enfoque.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los activos afectados por cada uno de los tres eventos, estudiando los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, al igual que lo que ocurría en los anteriores enfoques, la cantidad de activos residenciales afectados es mayor en el periodo de retorno de los 500 años por ser el más extremo.

| T. Retorno | Activos afectados |
|------------|-------------------|
| 10 | 4.316.533,62 € |
| 100 | 47.182.812,39 € |
| 500 | 67.890.220,74 € |

Tabla 28. Activos afectados en base al enfoque 3

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado, DAE. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Dicha gráfica se muestra en la figura 58.

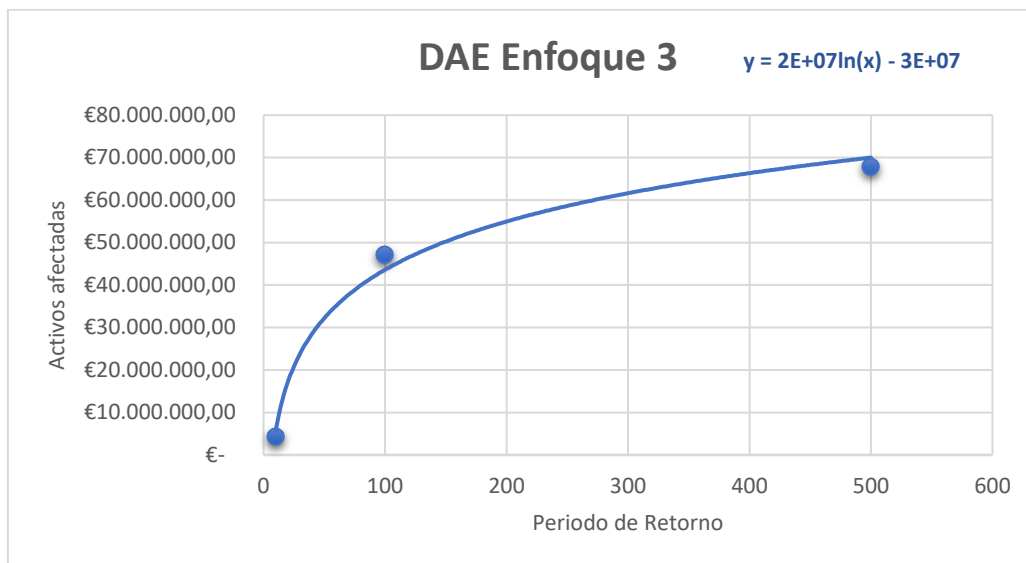


Figura 58. Representación del DAE en base al enfoque 2

El DAE o daño anual esperado, se obtiene como el área bajo dicha curva. Como bien se ha comentado, dicha área se ha obtenido a partir de dos métodos diferentes. El primero de ellos consiste en un método numérico, basado en la suma de trapecios tomando como vértices los puntos conocidos. Por tanto, la expresión tiene la siguiente forma:

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (4.316.533,62 + 47.182.812,39) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (47.182.812,39 + 67.890.220,74) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 2.777.762,70 \text{ €}}$$

El método analítico es la segunda de las formas para obtener el área bajo la curva, es decir, asemeja la curva a una función de daño, una función logarítmica que pase por los tres puntos conocidos. Dicha función logarítmica es la que se muestra continuación:

$$\text{Función de daño: } y = a + b * \ln(p)$$

$$y = 2 * 10^7 \ln(x) - 3 * 10^7$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 2 * 10^7 * e^{\frac{-3*10^7}{2*10^7}} \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 4.462.603,20 \text{ €}}$$

Por tanto, los resultados obtenidos del enfoque 3 se podrían resumir en la siguiente tabla:

| T. Retorno | Activos afectados |
|----------------------|-------------------|
| DAE analítico | 4.462.603,20 € |
| DAE numérico | 2.777.762,70 € |

Tabla 29- Resumen de resultados DAE en base al enfoque 3

5.2.4. Análisis de diferencias

En la tabla 30 que se muestra a continuación, se resumen todos los resultados del análisis de riesgo de activos residenciales obtenidos según los enfoques descritos previamente. Se muestran los activos afectados por riesgo de inundación según un enfoque y un periodo de retorno determinado.

| T. Retorno | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|----------------------|--------------------|------------------|-----------------|
| 10 | 484.859.221,46 € | 13.682.728,37 € | 4.316.533,62 € |
| 100 | 1.227.499.834,69 € | 109.778.102,77 € | 47.182.812,39 € |
| 500 | 1.510.269.537,85 € | 150.632.187,15 € | 67.890.220,74 € |
| DAE analítico | 222.245.456,20 € | 8.925.206,41 € | 4.462.603,20 € |
| DAE numérico | 88.007.235,02 € | 6.597.378,56 € | 2.777.762,70 € |

Tabla 30. Resumen de resultados obtenidos de análisis de vulnerabilidad

Analizando previamente el daño obtenido por cada uno de los enfoques según el periodo de retorno considerado, se observa una amplia variación entre los resultados obtenidos en el enfoque 1 y los obtenidos en los otros dos enfoques, justificado por la falta de precisión del enfoque 1.

De dichos resultados se puede concluir que el análisis de riesgo mejora de manera superlativa a medida que se mejora la precisión de los datos de exposición, siendo por tanto los datos más precisos los obtenidos en el enfoque 3.

Con respecto a la diferencia entre los enfoques 2 y 3, es debida obviamente a la información extra utilizada en el tercer enfoque, haciendo uso de las alturas de los edificios. Esto genera una variación en los resultados, pero no tan evidente como la que se ha visto entre el enfoque 1 y 2. La distribución de los activos según superficie y altura de los edificios es importante, pero la diferencia no es tan notoria ya que la diferencia de alturas entre los edificios no es muy grande, siendo una ciudad de casi 200.000 habitantes donde la distribución de la población es más o menos homogénea, y con ello la distribución de los activos.

En la tabla que se muestra a continuación se expresa la diferencia entre los datos analizados de forma numérica. Se ha tomado como unidad los resultados obtenidos en el enfoque 3 por ser éste el más preciso. Se aprecia una diferencia próxima a 115 unidades entre el enfoque 1 y el enfoque 3 lo cual es una variación muy apreciable, y demuestra la evolución del nivel de daño en función de la precisión en el análisis de la exposición.

| T. Retorno | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| 10 | 112,33 | 3,17 | 1,00 |
| 100 | 26,02 | 2,33 | 1,00 |

| | | | |
|-----|-------|------|------|
| 500 | 22,25 | 2,22 | 1,00 |
|-----|-------|------|------|

Tabla 31. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques

Lo mismo ocurre con los resultados obtenidos del DAE. Siendo esto un resultado obtenido a partir de la combinación de datos según los tres periodos de retorno se podría tomar estas variaciones como resumen de las diferencias entre el análisis de riesgo según cada uno de los enfoques, haciendo ver en dichos valores la considerable mejoría obtenida al mejorar el análisis de exposición.

| T. Retorno | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| DAE analítico | 49,80 | 2,00 | 1,00 |
| DAE numérico | 31,68 | 2,38 | 1,00 |

Tabla 32. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques

Se aprecia por tanto una variación próxima a 50 puntos entre el primer enfoque y el tercer enfoque, el más preciso.

Analizando ahora las diferencias obtenidas entre la obtención de DAE según dos métodos diferentes, en principio, los dos métodos deberían arrojar resultados similares bajo el supuesto de que la relación log-lineal postulada es razonable. Sin embargo, la cantidad de cálculos de riesgo requeridos difiere sustancialmente, lo cual significa que el método analítico proporciona un resultado más exacto.

| T. Retorno | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|---------------|------------------|----------------|----------------|
| DAE analítico | 222.245.456,20 € | 8.925.206,41 € | 4.462.603,20 € |
| DAE numérico | 88.007.235,02 € | 6.597.378,56 € | 2.777.762,70 € |

Tabla 33. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques

Esto se debe principalmente a que el modo de calcular el área bajo la curva a partir del cálculo de la integral de la función que la define es más preciso que el cálculo del área mediante la suma de áreas de trapezios que se asemejen al área bajo la curva. Por ello, los resultados, aunque ambos dos sean fiables, los obtenidos mediante el método analítico son más precisos.

Como se observa en la tabla 34, las variaciones entre dichos métodos se hacen más notables en el enfoque 1 ya que las diferencias de activos residenciales afectados obtenidos entre los distintos periodos de retorno son mayores en este primero enfoque, siendo considerablemente inferiores en los otros dos, gracias a una mejor distribución de los activos.

Se observa por tanto que las variaciones observadas entre los dos métodos en los enfoques dos y tres son similares, dado que los activos afectados en los distintos periodos de retorno son similares, y la precisión de estos dos métodos no difiere tanto como en lo correspondiente al enfoque 1.

| T. Retorno | ENFOQUE 1 | ENFOQUE 2 | ENFOQUE 3 |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| Variación | 60,4% | 26,1% | 37,8% |

Tabla 34. Tabla comparación de resultados de daño entre enfoques



6. Evaluación frente a cambio climático

La segunda parte de este análisis se ha enfocado hacia la evaluación de la variación de la exposición y vulnerabilidad de la población y activos residenciales frente un aumento de la cota de inundación como consecuencia del cambio climático.

Es preciso este análisis de cambio climático dado que las inundaciones son eventos muy importantes capaces de ocasionar grandes pérdidas de diversa índole, los cuales se pueden ver altamente modificados por causa del efecto climático, agravando mucho las consecuencias. Por un lado, se trata de eventos que ocurren a escalas temporales cortas y de baja frecuencia de ocurrencia, en las que los modelos climáticos generan resultados sujetos a mayor incertidumbre. Por otro, las inundaciones están muy influenciadas por factores no climáticos, como son los demográficos o los cambios de uso de suelos. En consecuencia, no hay un elevado grado de consenso sobre si la ocurrencia y magnitud de los episodios de inundación han aumentado debido al cambio climático, cuestión que sigue sujeta a una incertidumbre elevada.

No obstante, el V Informe IPCC apunta no sólo al descenso de las precipitaciones sino también al aumento de la irregularidad en las próximas décadas en las latitudes medias, donde se sitúa la Península Ibérica. Pese a que las proyecciones cuantitativas acerca de la frecuencia e intensidad de los eventos de inundaciones están sujetas a una incertidumbre elevada, se estima que el número de días de grandes precipitaciones podría aumentar y que el cambio global puede intensificar el ciclo hidrológico, aumentando la frecuencia de las inundaciones en muchas partes de Europa.

En el caso de la Península Ibérica no hay consenso acerca de los cambios esperables en las precipitaciones extremas para el escenario temporal lejano 2070- 2100. Sin embargo, las precipitaciones máximas en 24 h., que pueden ocasionar problemas de crecida fluvial e inundaciones, podrían incrementarse un 5% en el conjunto peninsular para el horizonte 2050.

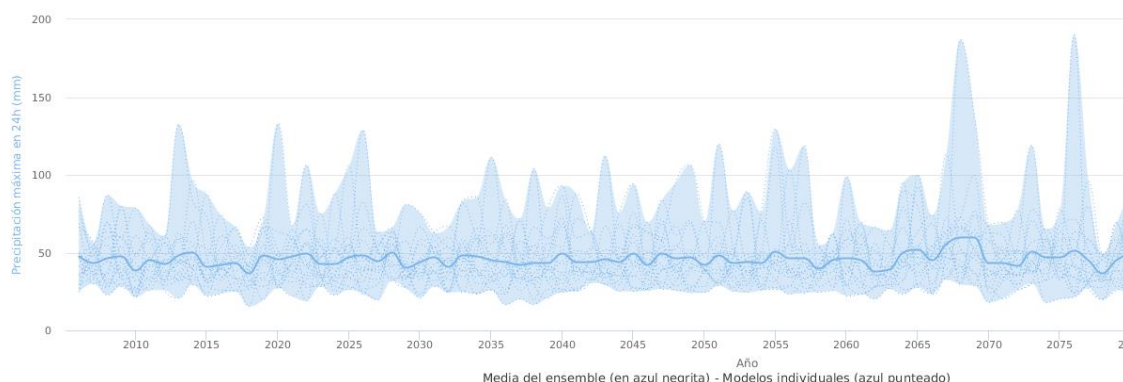


Figura 59. Oscilación de las precipitaciones máximas hasta 2075

Por otra parte, la posible existencia de sinergias entre distintos efectos generados por el cambio climático podría exacerbar los riesgos de inundaciones. Es el caso de los incendios forestales. Los modelos predicen no sólo el aumento de las temperaturas en verano, sino también una reducción de la precipitación primaveral. Todo ello apunta a una mayor severidad de las condiciones atmosféricas, lo que se traduciría en mayor número de incendios, mayor



intensidad del fuego y mayor superficie quemada, lo que podría aumentar el riesgo de inundaciones.

Finalmente, los escenarios de cambios de uso del suelo apuntan a que continuará en el futuro la tendencia al incremento de la superficie impermeable, incremento derivado del acelerado proceso de urbanización. El aumento de la urbanización, en ausencia de una cuidadosa ordenación territorial, seguirá suponiendo una creciente ocupación de zonas inundables, aumentando los bienes y las personas que pueden verse afectadas durante un episodio de inundación.

En definitiva, el riesgo de inundaciones seguirá aumentando en el futuro debido a un doble efecto del cambio global: por un lado, el cambio climático previsiblemente incrementará la frecuencia de los episodios de lluvias intensas y avenidas repentinas (aumento del peligro de inundaciones); por otro lado el cambio de usos del suelo, el otro componente del cambio global, incrementará la exposición de bienes y personas a las inundaciones (aumento de la vulnerabilidad).

Por todo ello se ha considerado imprescindible realizar un análisis de riesgo de potencial tanto de la población como de los bienes afectados por este tipo de eventos futuros. Para su evaluación de forma tangible se ha obtenido las posibles manchas de inundación que se generarían al incrementar el nivel del agua una cierta altura. Se ha creído conveniente elevar la cota de inundación 0.5m, 1m y 2m con respecto a las cotas de inundación tomadas en el análisis de riesgo previo.

Para poder llevar a cabo este enfoque se ha dividido el análisis en dos partes distintas. Es decir, se ha sustituido el efecto del cambio climático en Pamplona por un cambio en el Daño Anual esperado (DAE) más un incremento potencial de la población y activos afectados, puesto que no se dispone de datos suficientes para poder generar la mancha de inundación real asociada a los incrementos de cota descritos anteriormente.

6.1. Obtención del DAE

Por consiguiente, la primera parte de nuestro análisis se ejecutará de la siguiente manera. Primeramente, será necesario elevar el nivel la cota de inundación 0.5m, 1m y 2m respectivamente, para cada una de las manchas de inundación correspondientes a los distintos periodos de retorno, obteniendo así, nueve nuevos escenarios de exposición. Una vez obtenida dichas superficies se podrá obtener las personas y activos residenciales localizados bajo las manchas, aplicando, como se ha realizado previamente, unas funciones de daño que permitan obtener el Daño anual esperado en cada caso.

En este caso, se ha seguido utilizado en lenguaje de programación R como en los apartados previos. El código para este proceso se mostrará a continuación. Como la base de este proceso consiste en un aumento de las cotas de inundación previas, el primero paso a realizar es cargar las manchas de inundación que se generaron previamente como amenaza en el análisis de riesgo.

Posteriormente, se ha guardado con el nombre *rater.cc.0.5* a la nueva mancha de inundación obtenida como suma de la inicial más 0.5 metros en este caso, como se puede apreciar en la línea 23 de la figura 60. Por último, se ha creído conveniente guardar el ráster correspondiente a la nueva mancha para futuras acciones.

```
17 ~ ##### T=10años #####
18
19
20 #1. Cargamos mancha inundación actual
21 Pamp.flood<-raster("C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Manchas inundación/Pamp_Flood_T10.tif")
22 raster.cc.0.5 <-Pamp.flood
23 raster.cc.0.5[raster.cc.0.5>0] <- Pamp.flood[Pamp.flood>0] + 0.5]
24 writeRaster(raster.cc.0.5, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Cambio climatico/Pamp_Flood_T10_05m",
25
```

Figura 60. Código para la evaluación frente al cambio climático

A continuación, se ha procedido a evaluar tanto la población como los activos residenciales, de tal modo que posteriormente se podrá evaluar cuales de estos de veré afectados por riesgo de inundación. Es importante destacar la distribución de población que se ha escogido, pues por simplicidad y dado que el objetivo de este análisis no era el mismo que el descrito previamente para en análisis de riesgo inicial, se ha tomado como distribución de la población únicamente la correspondiente al enfoque 3, puesto que este enfoque es el más preciso de los tres descritos previamente.

Así pues, se ha cargado la población correspondiente al enfoque 3, siendo esta la que se va a analizar. Como se muestra en la figura 61, la función de daño utilizada para este caso de estudio es la misma que se utilizó previamente para la evaluación de población afectada frente a inundación, la cual estipula que las personas se verán afectadas por dicha inundación si esta supera los 0.5m en dicho lugar. Al haber aumentado la cota de inundación, es lógico que zonas donde el agua antes no alcanzaba dicha cota mínima de riesgo, ahora si se vean afectadas por estos eventos. Por todo ello, la población aumentada por dichos eventos deberá de ser igual (si no existiera población en dichas zonas) o superior a los resultados obtenidos previamente.

Se ha generado un ráster, que tomará el valor 0 en aquellos lugares donde la cota no supere la condición establecida, y tomará el valor 1 cuando sí se alcancen cotas superiores a 0,5m. Una vez generado dicho ráster, se ha multiplicado por el ráster de población, obteniéndose así la población afectada bajo dichas circunstancias.

```
119 # POPULATION
120 Pamp.pop.E3 <- raster("03. Resultados/Población/Pamp_Pob_Enfoque3_T100.tif")
121 Pamp.pop_total <- cellStats(Pamp.pop.E3, stat='sum', na.rm=TRUE)
122
123 # DAMAGES Population
124 Popul.Dam.10.E3 <- raster.cc.0.5
125 Popul.Dam.10.E3 <- crop(Popul.Dam.10.E3, Pamp.pop.E3)
126 Popul.Dam.10.E3[Popul.Dam.10.E3 < 0.5] <- 0
127 Popul.Dam.10.E3[Popul.Dam.10.E3 >= 0.5] <- 1
128
129 Popul.Dam.E10.E3 <- overlay(Popul.Dam.10.E3, Pamp.pop.E3, fun=function(x,y){x*y})
130 Popul.Dam.E10.E3.value <- cellStats(Popul.Dam.E10.E3, stat='sum', na.rm=TRUE)
131
132 writeRaster(Popul.Dam.E10.E3, "C:/Users/marta/Desktop/TFM_Saul_2.0/03. Resultados/Cambio climatico/0
133
```

Figura 61. Código para la evaluación frente al cambio climático

Seguidamente, se ha realizado el análisis de exposición de los activos residenciales, el cual, como ya se explicó previamente, es algo más complejo, dado que la función de daño que se ha utilizado está más fragmentada, esto requiere mayor cantidad de tiempo para la obtención de resultados. El código utilizado para llevar a cabo esta acción es el siguiente:

```
46 #VALOR CATASTRAL
47
48 Pamp.valor.E3 <- raster("03. Resultados/Valor Catastral/Pamp_valor_Enfoque3_T10.tif")
49 Pamp.valor_total <- cellStats(Pamp.valor.E3, stat='sum', na.rm=TRUE)
50
51 # DAMAGES Population
52 Valor.Dam.01 <- raster.cc.2
53 Valor.Dam.01 <- crop(Valor.Dam.01, Pamp.valor.E3)
54 Valor.Dam.01[Valor.Dam.01 < 0.001] <- 0
55 Valor.Dam.01[Valor.Dam.01 >= 1] <- 0
56 Valor.Dam.01 <- overlay(Valor.Dam.01, fun=function(x){x[x >= 0.001]; return(0.4*x)})
57
58
59 Valor.Dam.02 <- raster.cc.2
60 Valor.Dam.02 <- crop(Valor.Dam.02, Pamp.valor.E3)
61 Valor.Dam.02[Valor.Dam.02 < 1] <- 0
62 Valor.Dam.02[Valor.Dam.02 >= 3] <- 0
63 Valor.Dam.02 <- overlay(Valor.Dam.02, fun=function(x){x[x >= 1]; return(0.175*x+0.25)})
64
65
66 Valor.Dam.03 <- raster.cc.2
67 Valor.Dam.03 <- crop(Valor.Dam.03, Pamp.valor.E3)
68 Valor.Dam.03[Valor.Dam.03 < 3] <- 0
69 Valor.Dam.03[Valor.Dam.03 >= 5] <- 0
70 Valor.Dam.03 <- overlay(Valor.Dam.03, fun=function(x){x[x >= 3]; return(0.1*x+0.44)})
71
```

Figura 62. Código para la evaluación frente al cambio climático

```

73 valor.Dam.04 <- raster.cc.2
74 valor.Dam.04 <- crop(valor.Dam.04, Pamp.valor.E3)
75 valor.Dam.04[valor.Dam.04 < 5] <- 0
76 valor.Dam.04[valor.Dam.04 >= 6] <- 0
77 valor.Dam.04 <- overlay(valor.Dam.04, fun=function(x){x[x >= 5]; return(0.05*x+0.7)})
78
79
80 valor.Dam.05 <- raster.cc.2
81 valor.Dam.05 <- crop(valor.Dam.05, Pamp.valor.E3)
82 valor.Dam.05[valor.Dam.05 < 6] <- 0
83 valor.Dam.05[valor.Dam.05 >= 6] <- 1
84
85
86 valor.Dam.E3.01 <- overlay(valor.Dam.01, Pamp.valor.E3, fun=function(x,y){x*y})
87 valor.Dam.E3.02 <- overlay(valor.Dam.02, Pamp.valor.E3, fun=function(x,y){x*y})
88 valor.Dam.E3.03 <- overlay(valor.Dam.03, Pamp.valor.E3, fun=function(x,y){x*y})
89 valor.Dam.E3.04 <- overlay(valor.Dam.04, Pamp.valor.E3, fun=function(x,y){x*y})
90 valor.Dam.E3.05 <- overlay(valor.Dam.05, Pamp.valor.E3, fun=function(x,y){x*y})
91 valor.Dam.E3 <- overlay(valor.Dam.E3.01,
92                       valor.Dam.E3.02,
93                       valor.Dam.E3.03,
94                       valor.Dam.E3.04,
95                       valor.Dam.E3.05,
96                       fun=function(x,y,z,t,s){x+y+z+t+s})
97 valor.Dam.E3.value <- cellStats(valor.Dam.E3, stat='sum', na.rm=TRUE)
98

```

Figura 63. Código para la evaluación frente al cambio climático

El denominado raster.cc.2 contiene la información, en este caso, referida a ráster que contiene la mancha de inundación con la cota aumentada 2m. El código consiste en evaluar el daño en función de la altura a la que haya llegado en cada edificio, así pues, si la cota a la que está expuesto es mayor, mayores serán los daños acumulados. En la función de daño escogida, se considera la cota de agua supera los 6m el daño en las infraestructuras es total, es decir 1.

A partir del análisis realizado ya se pueden obtener los resultados buscados, y con ellos calcular el Daño Anual Esperado en estas zonas, para estas nuevas situaciones, es decir para un aumento de la cota de 0.25m, 0.5m, 1m y 2m.

6.1.1. Análisis de riesgo

Ahora bien, el objetivo de todo lo anterior es obtener cuanta población se verá afectada en base a la forma de las manchas de inundación iniciales, pero suponiendo un aumento de la cota de inundación de 0.25m, 0.5m, 1m y 2m.

Para la evaluación de riesgo se ha optado por analizar el daño que producirían cada uno de los tres periodos de retorno anteriormente mencionados teniendo en cuenta dicha subida de cota, pudiéndose así comprobar el aumento y evolución de las personas afectadas según esta nueva suposición, observando así el efecto del cambio climático sobre personas y activos residenciales.

Una vez obtenidos dichos daños, se pretende llegar a obtener el daño anual esperado (DAE), de tal modo que podamos llegar a estimar que número de personas estaría afectado por dichas inundaciones en un año, y observar así la severidad del evento.

Ya se ha descrito previamente que el daño anual esperado se va a obtener de dos formas distintas. Se obtendrá por un lado de forma analítica como la integración de la curva de densidad de riesgo de inundación sobre todas las probabilidades, y por otro lado, de forma numérica como la suma de trapecios bajo la curva de daño.



6.1.1.1. Riesgo sobre la población

Partiendo de los datos de población, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, se han obtenido las personas afectadas para cada periodo de retorno y para cada una de las cotas de inundación planteadas. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de personas afectadas.

En la tabla que se muestra a continuación se exponen las personas afectadas por cada uno de los tres eventos estudiando, los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Como era de esperar, la cantidad de personas afectadas es mayor en el periodo de retorno de los 500 años, pues se trata del evento de inundación que tiene una probabilidad de ocurrencia de 1/500, es decir, que tiene una probabilidad de ocurrir de una vez cada 500 años, y por tanto es el más extremos de los tres.

Junto con ello, las personas afectadas también aumentaran a medida que aumenta la cota de inundación propuesta, siendo por tanto mayor el número de personas afectadas, cuando aumentamos la cota 2m que cuando aumentamos 0.5m o 1m.

Sin embargo, no es esto lo que la tabla siguiente muestra. Se comprueba que los resultados obtenidos en los casos de 0.5m, 1m y 2m son exactamente los mismos, esto debe a que la función de daño utilizada para describir como se ve afectada la población frente al cambio climático establece como condición fundamental que todas las personas sometidas a cotas de inundación superiores a 0.5m se encontrarán en riesgo. Por tanto, en todos aquellos casos en los que se aumente la cota de inundación más de 0.5m, toda la población bajo dicha mancha se contabilizará como daño.

| T. Retorno | Estado Inicial (Enfoque 3) | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
|------------|-------------------------------|-------|------|-----|-----|
| 10 | 25 | 41 | 57 | 57 | 57 |
| 100 | 298 | 372 | 612 | 612 | 612 |
| 500 | 577 | 623 | 851 | 851 | 851 |

Tabla 35. Personas afectadas por aumento en la cota de inundación

Se ha adjuntado una columna con los resultados obtenidos en el enfoque 3 para cada uno de los periodos de retorno descritos. Es evidente que los resultados obtenidos en ese análisis son inferiores a los que se han obtenido en el resto. Pues, aunque el reparto de la población utilizado para cada uno de ellos es el mismo, la cota de la mancha de inundación difiere en varios metros con respecto a la mancha inicial, y con ello las personas afectadas.

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado para cada uno de los casos evaluados. Es evidente, dado que los resultados obtenidos son los mismos, que el Daño Anual Esperado para los tres últimos casos va a ser el mismo. Se ha utilizado dos métodos diferentes para obtener el DAE al igual que se hizo previamente.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. Se han obtenido dos curvas distintas, una representativa del daño ocasionado para un incremento de la cota de inundación de 0.25m y otra que representa el daño ocasionado cuando el incremento en la conta de inundación supera los 0.5m.

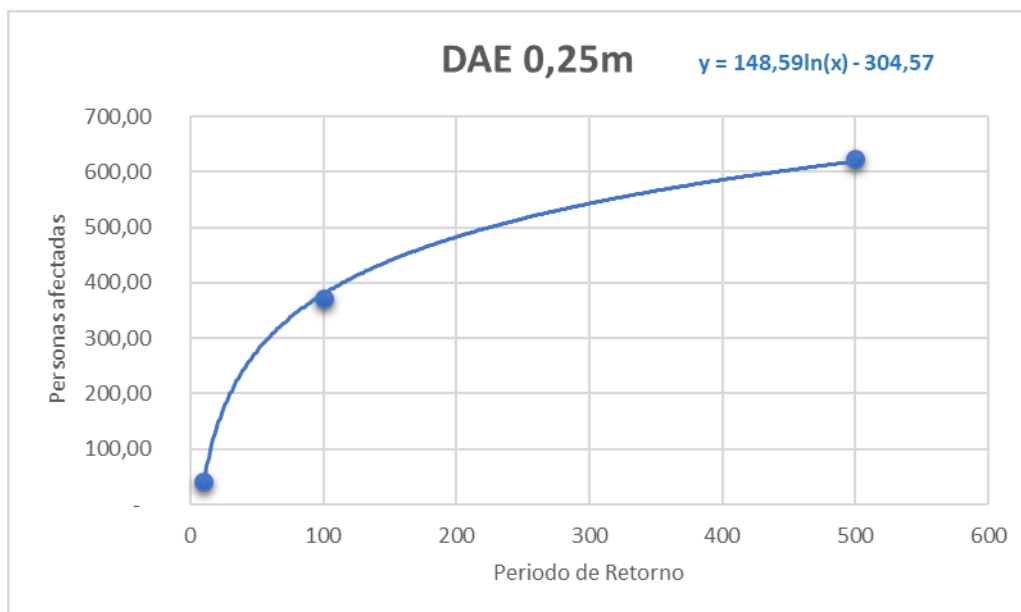


Figura 64. DAE para un aumento de la cota de inundación de 0.25m

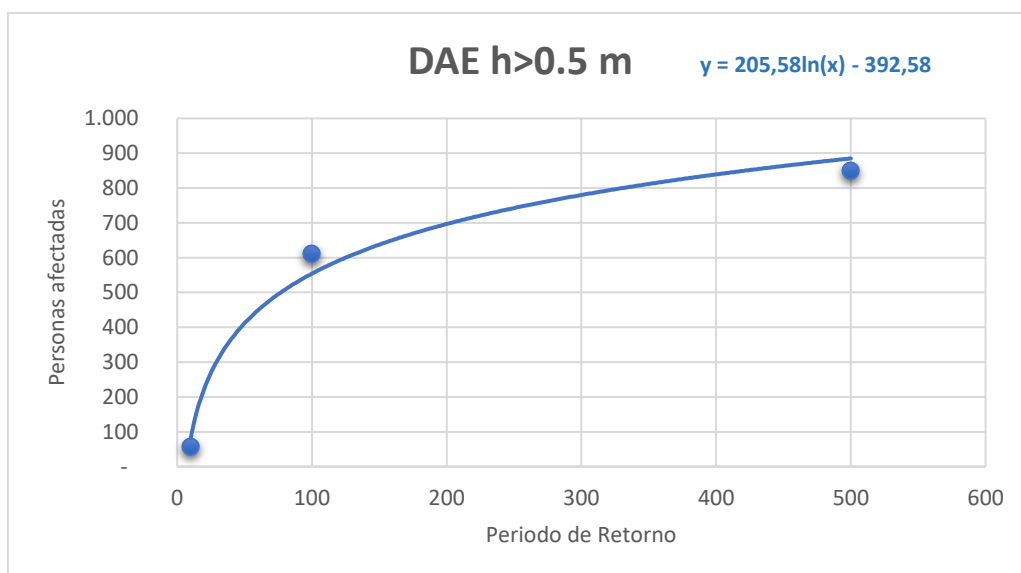


Figura 65. DAE para un aumento en la cota de inundación superior a 0.5m

El siguiente paso por tanto consiste en obtener el Daño Anual Esperado (DAE). El primer procedimiento consiste en un método numérico, basado en la suma de trapecios tomando como vértices los puntos conocidos. Por tanto, la expresión tiene la siguiente forma:



$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1})$$

1. DAE numérico 0.25m

$$\begin{aligned} DAE &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) = \\ &= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (41 + 372) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (372 + 623) \right] \rightarrow \\ &\quad \underline{DAE = 23 \text{ personas}} \end{aligned}$$

2. DAE numérico casos con incremento de cota superior a 0.5m

$$\begin{aligned} DAE &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) = \\ &= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (57 + 612) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (612 + 851) \right] \rightarrow \\ &\quad \underline{DAE = 36 \text{ personas}} \end{aligned}$$

El segundo modo de obtener el DAE es mediante el método analítico, asemeja la curva a una función de daño, una función logarítmica que pase por los tres puntos conocidos. El procedimiento es el que se muestra a continuación:

1. DAE Analítico 0.25m

$$\begin{aligned} \text{Función de daño: } y &= a + b * \ln(p) \\ y &= 148.59 \ln(x) - 304.57 \end{aligned}$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$\begin{aligned} DAE &= b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 148.59 * e^{\frac{-304.57}{148.59}} \rightarrow \\ &\quad \underline{DAE = 20 \text{ personas}} \end{aligned}$$

2. DAE analítico casos con incremento de cota superior a 0.5m

$$\begin{aligned} \text{Función de daño: } y &= a + b * \ln(p) \\ y &= 205.58 \ln(x) - 392.58 \end{aligned}$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 205.58 * e^{\frac{-392.58}{205.58}} \rightarrow$$



$$DAE = 30 \text{ personas}$$

Resumiendo todo lo anterior expuesto en una única tabla se concluye:

| | Estado Inicial | 0,25m | >0,5m |
|----------------------|----------------|-------|-------|
| DAE analítico | 15,00 | 20,00 | 30,00 |
| DAE numérico | 18,00 | 23,00 | 36,00 |

Tabla 36. Resumen de resultados obtenidos

En base a los resultados obtenidos, es evidente el considerable aumento de personas afectadas al evaluar los efectos que el cambio climático provocaría en la población, aunque el número de personas que anualmente se ven afectas por este tipo de eventos no es muy elevado en ninguno de los casos, este análisis sirve para poder dejar plasmando lo rápido que el número de personas se ve incrementado al aumentar la cota de inundación a la que están expuestos. Expresado en porcentajes con respecto al daño inicial, los resultados serían los siguientes:

| | 0,25m | >0,5m |
|----------------------|-------|-------|
| DAE analítico | 133% | 200% |
| DAE numérico | 128% | 200% |

Tabla 37. Resumen de resultados

Es decir, los efectos del cambio climático podrían llegar a provocar un aumento del 200% con respecto a la cantidad de población afectada.

Para concluir, en la tabla 38 que se muestra a continuación, se resumen todos los resultados del análisis de riesgo de población. Se muestran la población afectada por riesgo de inundación según la cota de inundación y un periodo de retorno determinado.

| T. Retorno | Estado Inicial | 0,25m | 0,5m |
|----------------------|----------------|-------|------|
| 10 | 25 | 41 | 57 |
| 100 | 298 | 372 | 612 |
| 500 | 577 | 623 | 851 |
| DAE analítico | 15 | 20 | 30 |
| DAE numérico | 18 | 23 | 36 |

Tabla 38. Personas afectadas por aumento de la cota de inundación

6.1.1.2. Riesgo sobre los activos residenciales

Partiendo de los datos de activos residenciales existentes, las manchas de inundación previamente descritas y la función de daño planteada, en este caso más compleja que la utilizada para el análisis de daño en la población, se han obtenido los activos afectados para cada periodo de retorno y para cada una de las cotas de inundación planteadas. De este modo posteriormente se podrá obtener el daño anual esperado en base a los resultados obtenidos de activos afectados. Todo ello suponiendo un aumento de la cota de inundación de 0.25m, 0.5m, 1m y 2m.

Es preciso destacar, que en este caso sí que se ha apreciado variación en cuanto a los activos afectados entre unos niveles y otros, pues al ser una función más discreta que tiene en cuenta



el daño en función la altura según lo que se ha descrito en capítulos anteriores, se comprueba que no todos los activos situados en la zona de riesgo se ven afectados de la misma manera, no así ocurre en el caso de la población, donde se comprobó que toda la superficie de población en riesgo estaba sometida a profundidades superiores a 0.5m.

Para la evaluación de riesgo se ha optado por analizar el daño que producirían cada uno de los tres periodos de retorno anteriormente mencionados pudiéndose así comprobar las diferencias entre cada uno de ellos, y, por ende, comprobar cómo se incrementa la cantidad de activos residenciales expuestos en cada uno de los casos.

Con se indicó en el análisis de vulnerabilidad, para evaluar los activos afectados se utilizó una función de daño en la que, según la altura de inundación, los daños los daños generados en dichos activos eran de mayor o menor envergadura. En base a ello, se ha realizado un análisis de riesgo de los mismos.

En la tabla que se muestra a continuación se exponen los activos residenciales afectados por cada uno de los tres eventos estudiando y los tres periodos de retornos sobre los que se basa el análisis. Se comprueba que el número de activos afectados es superior a medida que aumenta el periodo de retorno, además de que dichos activos también aumentarían a medida que aumenta la cota de inundación propuesta, siendo por tanto mayor el número de activos afectados, cuando aumentamos la cota 2m que cuando aumentamos 0.5m o 1m.

| T. Retorno | Estado Inicial (Enfoque 3) | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
|------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10 | 4.316.533,62 € | 4.497.601,94 € | 4.691.600,23 € | 4.655.698,91 € | 4.926.823,64 € |
| 100 | 47.182.812,39 € | 48.916.726,49 € | 50.107.861,60 € | 50.156.603,59 € | 53.931.384,28 € |
| 500 | 67.890.220,74 € | 69.479.719,40 € | 71.050.751,00 € | 71.728.320,79 € | 75.006.496,94 € |

Tabla 39. Activos residenciales afectados por aumento de la cota de inundación

Como en el apartado anterior, se ha añadido en la primera columna los datos correspondientes a los resultados obtenidos en el enfoque 3 en apartados anteriores. Se comprueba como era de esperar que los resultados obtenidos son peores en las nuevas situaciones planteadas, ya que los edificios estarán sometidos a mayores alturas de inundación, lo que se traduce en mayor daño y mayor cantidad de activos residenciales afectados.

En estos casos sí que hay diferencias entre la cuantía de activos afectados entre unos escenarios y otros, esto se debe a que la función de daño que se ha utilizado es distinta, y en este caso cada cota de inundación llevará asociada un factor de daño distinto.

| Cota inundación (m) | Daño |
|---------------------|------|
| 1 | 0,4 |
| 2 | 0,65 |
| 3 | 0,75 |
| 4 | 0,85 |
| 5 | 0,95 |
| 6 | 1 |

Tabla 40. Factor de daño en función de la cota de inundación

Una vez obtenidos dichos resultados, se ha procedido a obtener el daño anual esperado para cada uno de los casos evaluados. Para lo cual se ha utilizado dos métodos diferentes al igual que se hizo previamente.

Para llevar a cabo estos dos métodos, y poder interpretar de manera más adecuada los resultados se han representado los mismos en una gráfica que relaciona el daño obtenido con cada periodo de retorno. La idea inicial ha sido la obtención de cuatro curvas DAE distintas, una para cada incremento de cota planteado, pero dada la poca variación entre los activos afectados entre unas y otras circunstancias, las curvas obtenidas han sido idénticas. A continuación, se representa dicho resultado.

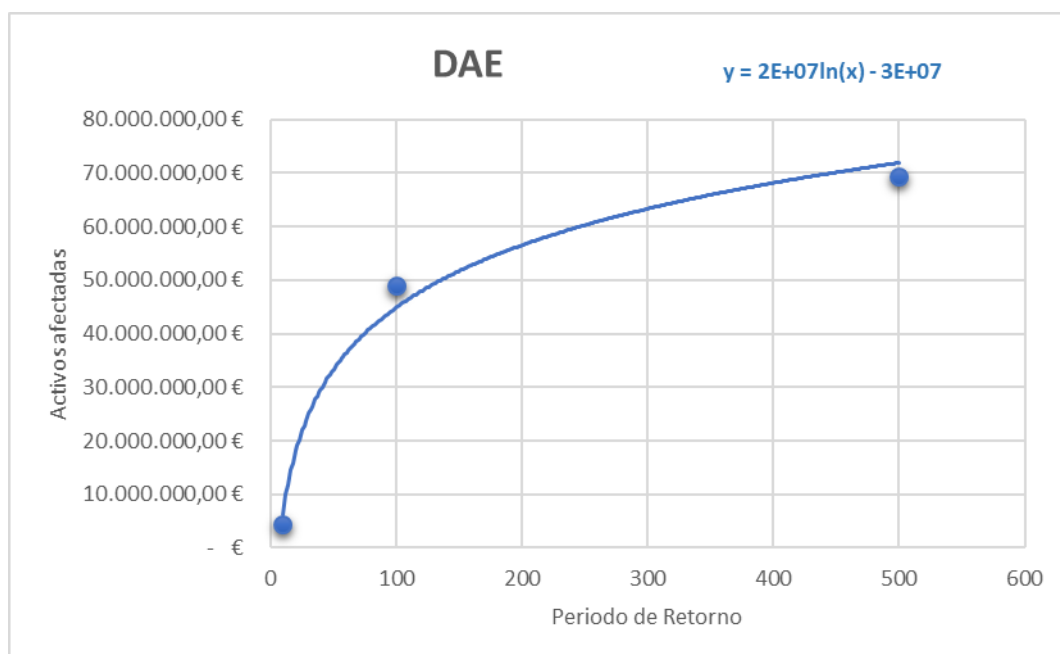


Figura 66. DAE asociado a los activos residenciales afectados

Esto conlleva a que el DAE obtenido como el área bajo la curva, sea el mismo para todos y cada uno de los casos de análisis, puesto que la ecuación de la curva utilizada será la misma. Por el contrario, si se obtiene el DAE como suma de trapecios, habrá una ligera diferencia entre unos resultados y otros, pues este método utiliza los puntos concretos obtenidos del análisis.

Obteniendo primero los resultados mediante el método numérico, basado en la suma de trapecios tomando como vértices los puntos conocidos. Por tanto, la expresión tiene la siguiente forma:

1. DAE numérico 0.25m

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$



$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (4.497.601,94 + 48.916.726,49) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (48.916.726,49 + 69.479.719,40) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 2.877.230,56 \text{ €}}$$

2. DAE numérico 0.5m

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (4.691.600,23 + 50.107.861,60) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (50.107.861,60 + 71.050.751,00) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 2.950.610,23 \text{ €}}$$

3. DAE numérico 1m

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (4.655.698,91 + 50.156.603,59) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (50.156.603,59 + 71.728.320,79) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 2.954.093,31 \text{ €}}$$

4. DAE numérico 2m

$$DAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) =$$

$$= \frac{1}{2} * \left[\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{100} \right) * (4.926.823,64 + 53.931.384,28) + \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right) * (53.931.384,28 + 75.006.496,94) \right] \rightarrow$$

$$\underline{DAE = 3.164.370,88 \text{ €}}$$

Por otro lado, la obtención de Daño Anual esperado en base a métodos analíticos, es decir mediante la obtención del área bajo la curva anteriormente descrita. La función de daño se a asemejado a una función logarítmica definida por los tres puntos conocidos.

$$\text{Función de daño: } y = a + b * \ln(p)$$

$$y = 2 * 10^7 \ln(x) - 3 * 10^7$$

Obteniendo el área bajo la curva como la integral de la anterior expresión se obtiene:

$$DAE = b * \exp\left(\frac{a}{b}\right) = 2 * 10^7 * e^{\frac{-3*10^7}{2*10^7}} \rightarrow$$

$$DAE = 4.462.603,20 \text{ €}$$

Por tanto, los resultados obtenidos mediante ambos métodos son los siguientes:

| | Estado Inicial | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| DAE analítico | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € |
| DAE numérico | 2.777.762,70 € | 2.877.230,56 € | 2.950.610,23 € | 2.954.093,31 € | 3.164.370,88 € |

Tabla 41. Resumen de DAE por efectos del cambio climático

Se comprueba una amplia diferencia entre los resultados del DAE obtenidos en base a un método analítico y en base a un método numérico, esto se debe a que la cantidad de datos de los que se dispone que describan la inundación son escasos, es decir, únicamente se disponen de tres periodos de retorno que caractericen el fenómeno que se está analizando.

Dada esta ausencia de datos, la simplificación realizada por el método numérico no es muy exacta, por lo cual difiere bastante de la analítica ya que sustituye el área bajo la curva por trapecios, despreciando zonas bajo la curva, y debido a la escasez de periodos de retorno, dichas áreas no tenidas en cuenta pueden llegar a ser considerablemente grandes.

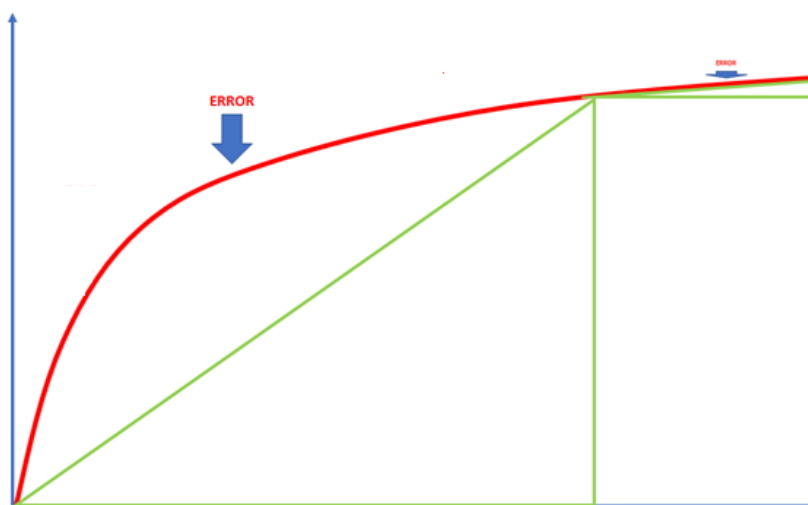


Figura 67. Diferencias entre el DAE numérico y el analítico

Por su parte la solución analítica se obtiene en base a la aproximación de los puntos discretos a una curva representativa de los mismos, si se pudiera disponer de más punto, es decir, de más casos concretos, y por tanto de mayor numero de periodos de retorno, se podría obtener una curva más exacta representativa de dichos puntos.

Para concluir, en la tabla 42 que se muestra a continuación, se resumen todos los resultados del análisis de riesgo de activos residenciales. Se muestran los activos afectados por riesgo de inundación según la cota de inundación y un periodo de retorno determinado.



| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10 | 4.497.601,94 € | 4.691.600,23 € | 4.655.698,91 € | 4.926.823,64 € |
| 100 | 48.916.726,49 € | 50.107.861,60 € | 50.156.603,59 € | 53.931.384,28 € |
| 500 | 69.479.719,40 € | 71.050.751,00 € | 71.728.320,79 € | 75.006.496,94 € |
| DAE analítico | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € |
| DAE numérico | 2.877.230,56 € | 2.950.610,23 € | 2.954.093,31 € | 3.164.370,88 € |

Tabla 42. Resumen de daño debido al cambio climático



6.2. Elementos potencialmente expuestos

Existe una parte del daño que va a experimentar tanto la población como los activos residenciales que es imposible de medir en términos de Daño Anual Esperado, debido a la gran incertidumbre que existe sobre ellos.

Se puede estimar con cierta precisión como se verían afectados los elementos de estudio que se encuentran en el área bajo las manchas de inundación ya conocidas, que es, en concreto, lo que se ha descrito en el apartado anterior. Sin embargo, se desconoce cuál sería el nuevo alcance de la mancha de inundación tras aumentar su nivel las cantidades establecidas de 0.25m, 0.5m, 1m, y 2m.

Al no poder obtenerse dichos valores con precisión, los resultados que se obtendrán de este análisis serán meramente orientativos, es por ello que, se les ha denominado población y activos potencialmente expuestos. Con esto se quiere expresar que dichos elementos podrían o no estar expuestos a fenómenos de inundación por una subida de nivel debida al cambio climático.

Para la evaluación de dicha exposición, primeramente, se requiere de la obtención de la superficie de la nueva mancha de inundación, la extensión de la misma, para evaluar los activos y población que se encuentra bajo ella. Es importante tener en cuenta que para la realización de este análisis ha sido necesario realizar numerosas simplificaciones que se irán explicando a continuación.

Para ello, a partir de la evaluación de la topografía disponible y utilizando elementos como Google Aarth, ArcGis o RStudio entre otros, se ha procedido a obtener la pendiente media de la ciudad de Pamplona. Se ha tomado una pendiente media del 4,2%, sin embargo para poder llegar a este valor ha sido necesario hacer numerosas simplificaciones, pues la pendiente de Pamplona en torno al río Arga no es muy regular. Se han ido obteniendo diferentes perfiles longitudinales de la zona observándose en todos resultados similares. En la figura 68 se muestra un ejemplo de la forma característica de los perfiles longitudinales tomados a lo largo del río.

Se representa una captura un perfil longitudinal tomado seccionando al río para así poder analizar las superficies que se encuentran a ambos lados del mismo. Se observan grandes variaciones de pendiente entre un margen y otro del cauce. En la zona al norte del río, dibujada en el perfil longitudinal a la izquierda, se aprecia un transcurrir de la superficie muy tendido, con pendientes que oscilan entre 2% y 3%. Sin embargo, en la zona sur del río, la parte derecha el perfil longitudinal, se aprecia un gran salto, próximo a los 20m, contribuyendo a que una subida del nivel del río nunca vaya a afectar a las zonas que se encuentren en este margen.

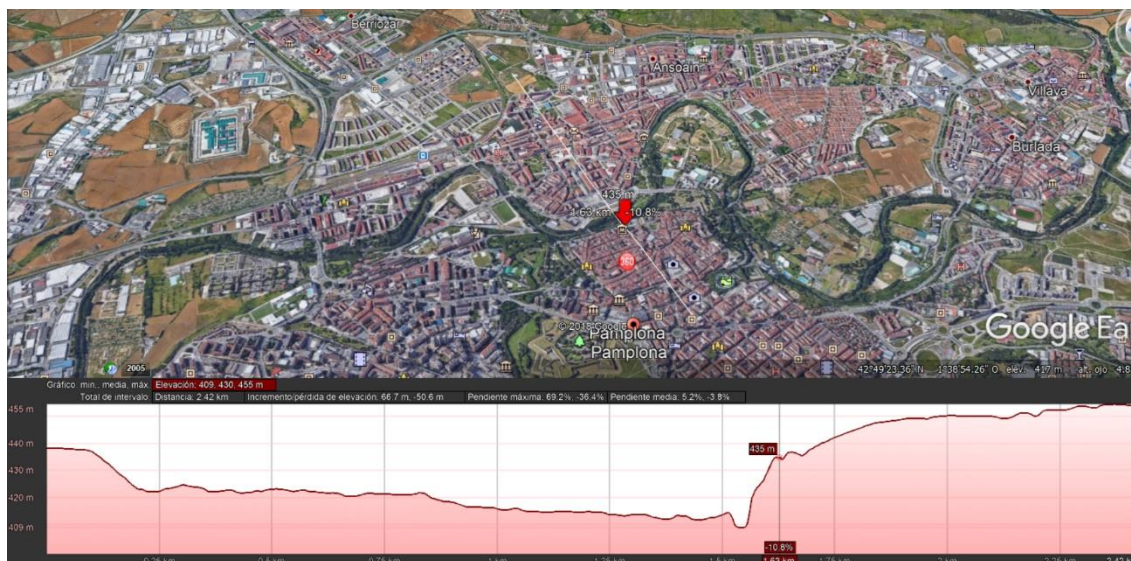


Figura 68. Ejemplo de perfil longitudinal de Pamplona

Si solo se tomase referencia la zona norte, la parte izquierda del río, la pendiente media que se ha estimado tras dibujar numerosos perfiles transversales fue de 2,1%, lo cual equivaldría a anegar una superficie de 12m si aumentamos la cota de inundación en 0.25m. Dada la complejidad de la geometría del río, y la variación de la pendiente entre unas zonas y otras, sería obligatorio aplicar dicha extensión de 12 metros en planta a ambos lados del margen del río. Sin embargo, esto difiere mucho de la realidad, dada la elevación del terreno que se produce en la margen derecha. Tomar esta suposición, conllevaría suponer anegada una superficie de 12m de ancho, la cual nunca llegará a estarlo. Es por ello que la solución que se ha tomado es la siguiente, se ha aumentado la pendiente media al doble, suponiéndola entonces de 4,2%, lo cual significa que anegará 6m de superficie a cada lado del río. Como se ha explicado, esto realmente no es lo que ocurre, pero se ha asumido que la población de la margen derecha que se anega equivale a la población de la margen izquierda que realmente se anegará pero que al aumentar nuestra pendiente queda fuera del alcance de la mancha de inundación.

Por tanto, como conclusión, se ha estimado una pendiente de 4,2% que equivale en cada uno de los casos a una longitud recorrida por el agua:

| Incremento de cota (m) | Lx (m) |
|------------------------|--------|
| 0,25 | 6 |
| 0,50 | 12 |
| 1,00 | 24 |
| 2,00 | 48 |

Tabla 43. Superficies potencialmente inundadas

Para la obtención de dichas superficies ha sido necesaria la utilización del programa ArcGis dado que la cantidad de datos a manejar ha sido muy elevada.

El objetivo principal de todo el proceso que se va a describir a continuación es obtener y contabilizar la cantidad de activos residenciales y población potencialmente afectada a causa de un aumento de la cota de inundación generada por el cambio climático.



Partiendo de los ráster que representan las manchas de inundación se han acabado obteniendo un ráster reducido únicamente con los elementos expuestos. A continuación, se muestra de forma esquemática el proceso que se ha llevado a cabo mediante el programa ArcGis, posteriormente se explicará más en detalle.

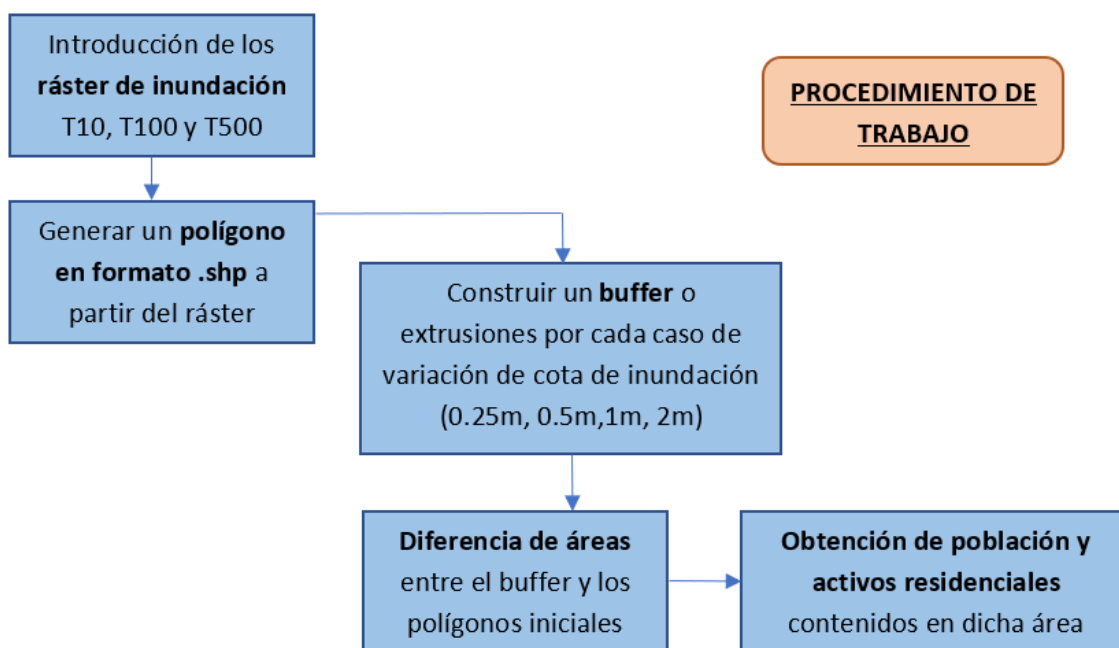


Figura 69. Proceso llevado a cabo para la obtención de resultados

Como bien se ha mencionado, primeramente, es preciso la introducción de los ráster de inundación en el programa. Una vez introducidos es preciso convertirlos a polígonos planos para poder trabajar con ellos como una superficie. Para poder generar dichos polígonos ha sido preciso convertir el ráster de tipo flotante (float) a tipo entero (integer), es decir, es necesario convertirlo a enteros, en sistema binario de 0s y 1s.

Arctoolbox > Spatial Analyst toolbox > Math > Int

Una vez convertido, se ha transformado dicho ráster en polígono como se muestra en la imagen:

Arctoolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon

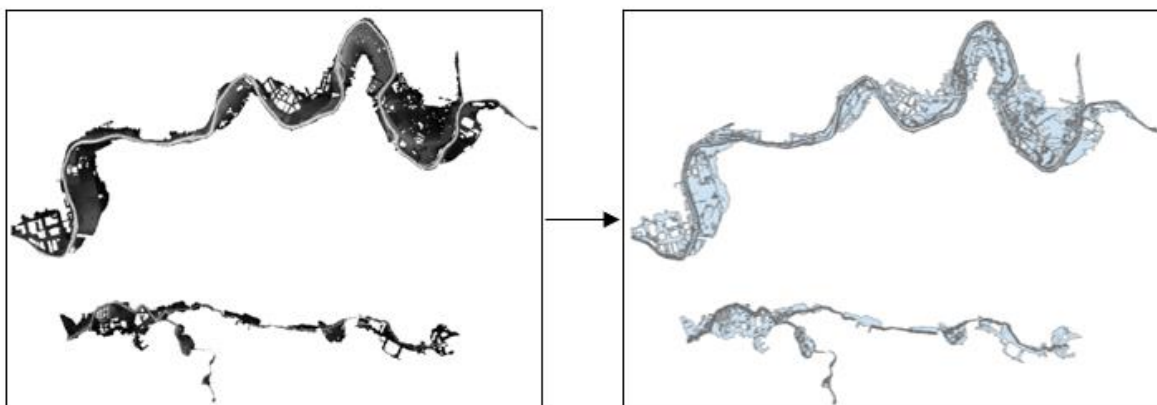


Figura 70. Conversión de ráster a polígonos

A continuación, se ha procedido a generar el buffer, es decir, se trata de realizar un desfase en planta de la superficie que se acaba de generar. La longitud de desfase dependerá como bien se ha comentado de la cota de inundación con la que se esté trabajando. Estas longitudes de desfase han quedado definidas en la tabla 43, obtenidas a partir de la pendiente media de la superficie de Pamplona. Por tanto, el comando ejecutado ha sido el siguiente.

Arctoolbox > Analysis Tools > Proximity > Buffer

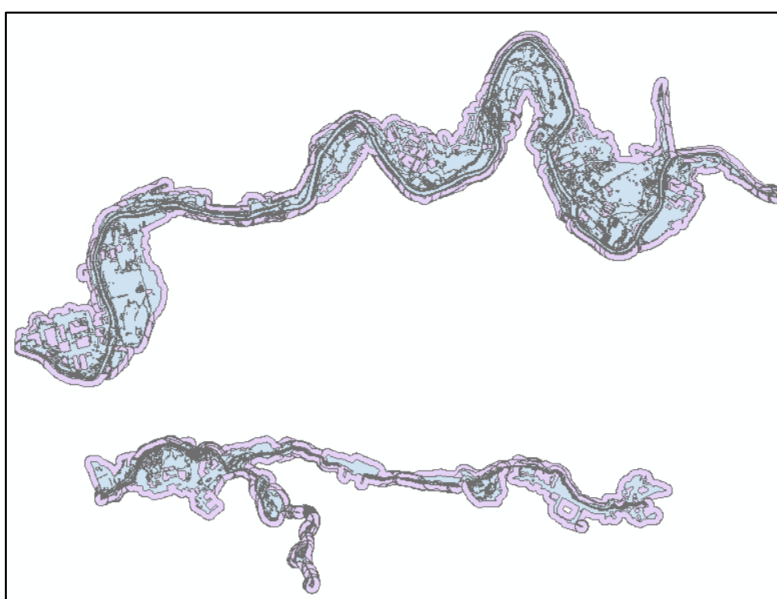


Figura 71. Buffer ejecutado con respecto al polígono de partida

En la figura 71, se muestra el polígono inicial sobre el buffer generado, en este caso representado el color morado, en este caso se ha generado con un desfase de 48m hacia cada lado, lo que equivale a un aumento de la cota de inundación de 2m. Posteriormente se ha procedido a realizar la diferencia entre el nuevo buffer generado y la superficie de polígono inicial, dado que la diferencia entre estas dos superficies será el área que según lo descrito previamente estará potencialmente afectada bajo los efectos de inundaciones a causa del cambio climático. Para realizar esta acción el comando que se ha utilizado ha sido el siguiente:

ArcToolbox > Analysis Tools > Overlay > Erase

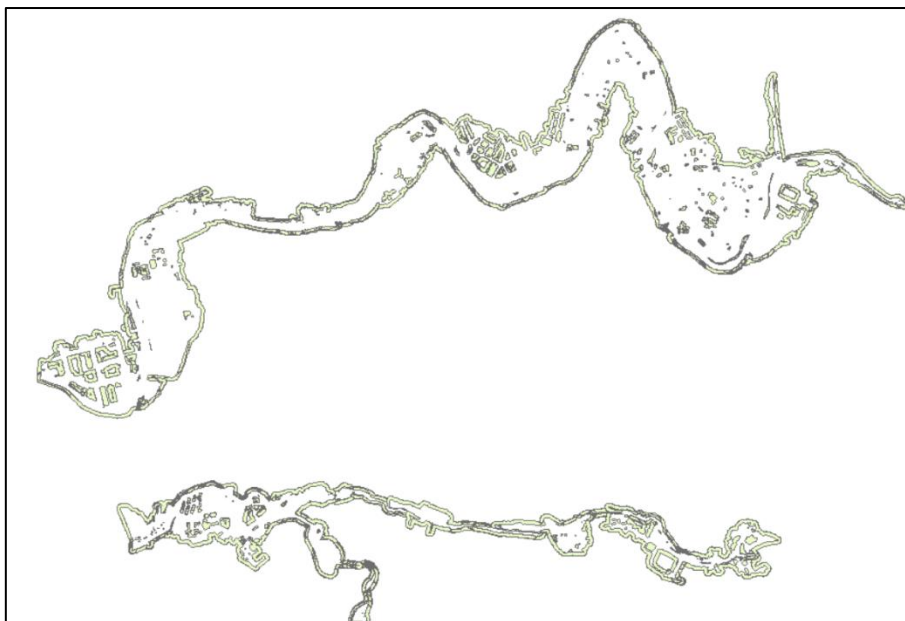


Figura 72. Diferencia entre el buffer y el polígono base

Una vez obtenida la zona que se va a ver afectada por las inundaciones planteadas, se ha procedido a calcular la población y activos residenciales que se localizan en esa área, pues serán esos los que se podrían ver afectados. Para ello, se ha ejecutado una máscara, se ha partido de la distribución de población obtenida a partir del enfoque 3 para calcular cuanta población reside bajo la superficie. A continuación, se muestra la población inicial y la población extraída que se encuentra en riesgo.

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask

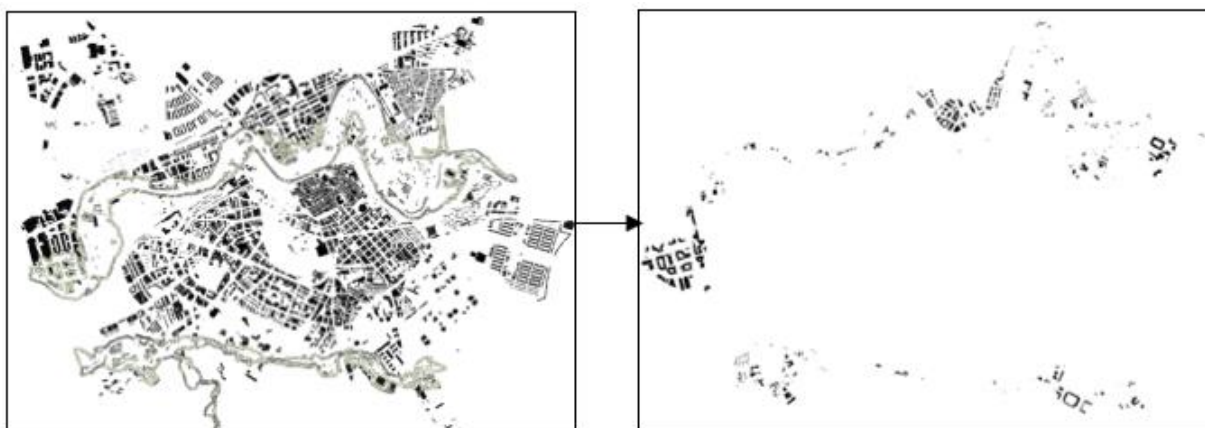


Figura 73. Población potencialmente afectada a causa del cambio climático

A la hora de evaluar los activos residenciales, el procedimiento a seguir es exactamente el mismo con la única diferencia de que en este caso el archivo a introducir y evaluar es el correspondiente al reparto de los activos residenciales en la superficie de Pamplona según el enfoque tres explicado previamente.



6.2.1. Análisis de riesgo potencial

A partir del procedimiento explicado se ha podido obtener el riesgo potencial en cada uno de los casos propuestos, tanto en términos de población como en términos de activos residenciales. Es importante matizar y recordar que los resultados obtenidos son una mera estimación, pero suficiente para poder evaluar el daño que podrían generar dichos eventos. Esto es a causa de que ha sido necesario realizar numerosas suposiciones para conseguir obtener los resultados que se mostrarán a continuación.

| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
|------------|-------|-------|-------|--------|
| 10 | 168 | 326 | 806 | 3.146 |
| 100 | 2.530 | 5.013 | 7.614 | 11.311 |
| 500 | 3.618 | 6.940 | 9.863 | 13.656 |

Tabla 44. Población potencialmente afectada por un aumento de la cota de inundación

A la hora de analizar los datos que se muestran en la tabla 44, se observa que el número de personas afectadas por este tipo de catástrofes debidas al cambio climático es bastante superior al que se obtenía en análisis previos de inundación. Esto se debe a que principalmente a dos motivos. El primer comentario es referente a la población que se obtiene del análisis. En este caso, la función de daño que se ha utilizado es mucho más conservadora que la que se utilizó en casos anteriores, se asume que toda la población que se encuentre localizada bajo la macha se verá afectada por dicha inundación no teniendo en cuenta como en el análisis previo, si la mancha de inundación es superior o inferior a la cota de inundación de 0.5m. Esta suposición es debida a que la superficie que se ha generado y sobre la que se está trabajando, es una superficie planta, sin conta, complicando por tanto el procedimiento de evaluación de la inundación en base a la función de daño que se ha venido usando hasta ahora. Esto genera que el número de personas potencialmente afectadas se superior al calculado en el análisis anterior.

En segundo de los matices a tener en cuenta es la densidad de población de dichas zonas. Se comprueba que la densidad de población en las zonas que van a ser afectadas por las inundaciones debidas al cambio climático están mucho más edificadas y por consiguiente, mucho más pobladas que las zonas que se inundaran en el análisis previo. A modo de ejemplo se muestran en las figuras siguientes las zonas inundadas en cada una de las circunstancias descritas. La primera de ellas muestra la mancha de población afectada en base a las manchas de inundación reales, y en la siguiente figura se muestra la mancha de población en riesgo debido a la estimación potencial de la mancha de inundación.

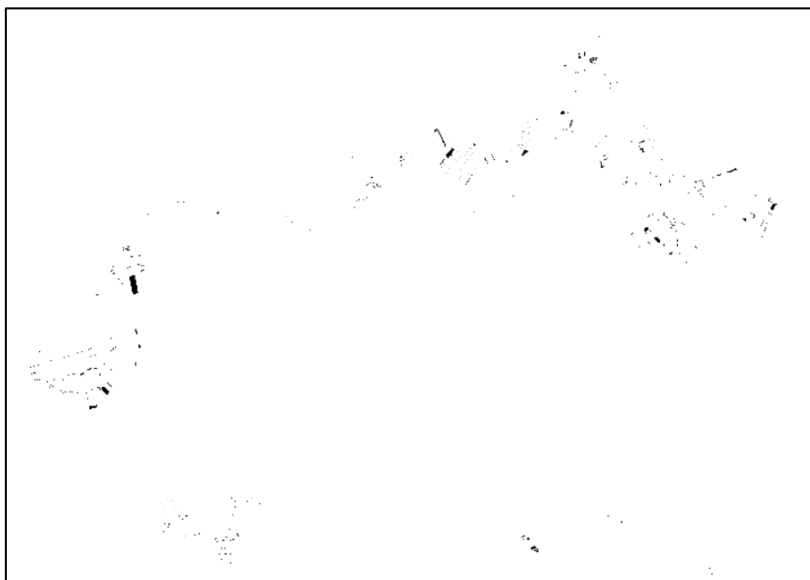


Figura 74. Población afectada previo al aumento de la cota de inundación

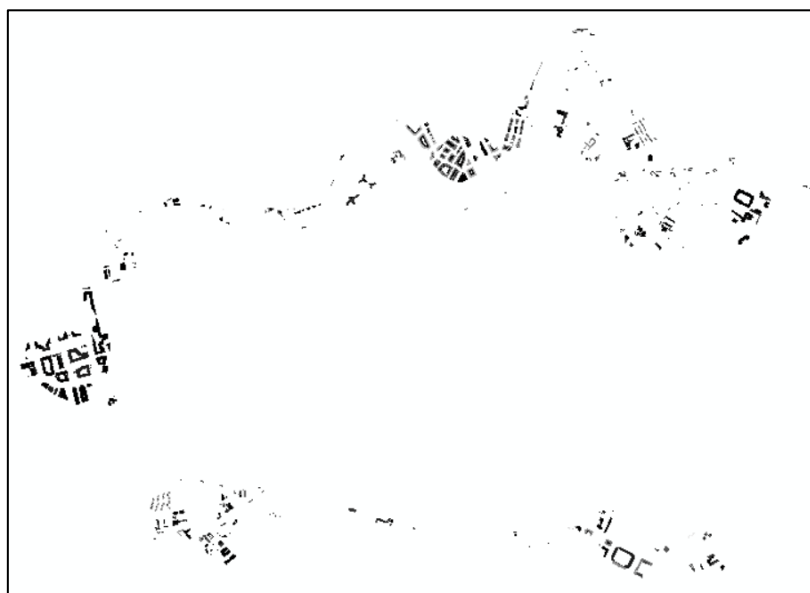


Figura 75. Población afectada tras aumentar la cota de inundación

En cuanto a los activos residenciales potencialmente afectados por variaciones de la cota de inundación causados por el cambio climático, se muestran en la tabla siguiente:

| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 10 | 8.444.036,96 € | 16.080.282,21 € | 39.724.404,06 € | 155.003.219,76 € |
| 100 | 124.666.976,05 € | 246.994.387,64 € | 375.126.317,84 € | 557.249.988,91 € |
| 500 | 178.267.013,69 € | 341.959.321,72 € | 485.958.108,89 € | 672.804.478,70 € |

Figura 76. Activos residenciales potencialmente afectados por el cambio climático.

Los resultados obtenidos también son bastante superiores a los obtenidos en el análisis de riesgo inicial. Las causas del aumento de estas cifras son las mismas que las que se han detallado para el caso del análisis de riesgo de la población.



En la obtención del DAE que se ha realizado previamente durante el análisis de cambio climático se ha comprobado que al introducir incrementos de cota superiores a 0.5m, y utilizando las funciones de daño habituales, toda la población se veía afectada, por tanto, en los tres últimos casos, en lo referente a población se obtenían los mismos resultados. No ocurre lo mismo en la situación ahora analizada pues el procedimiento y los datos que se analizan son muy distintas. En esta situación, se está analizando como varia la población afectada al variar la superficie afectada, contrariamente a lo que se ha realizado antes donde se evaluaba como variaba la población afectada en base a una variación de la cota de inundación. La base de las dos componentes es la misma, no así los elementos a evaluar.

6.3. Síntesis de resultados

De los resultados obtenidos en los dos apartados anteriores se concluye que las consecuencias causadas por efecto del cambio climático podrían llegar a ser muy perjudiciales para el ambiente urbano estudiado. A continuación, se muestran de forma resumida los resultados obtenidos a lo largo del análisis.

| Personas afectadas en zonas con mancha de inundación conocida | | | | |
|---|-------|------|-----|-----|
| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
| 10 | 41 | 57 | 57 | 57 |
| 100 | 372 | 612 | 612 | 612 |
| 500 | 623 | 851 | 851 | 851 |
| DAE analítico | 20 | 30 | 30 | 30 |
| DAE numérico | 23 | 36 | 36 | 36 |

Tabla 45. Personas afectadas en zonas con mancha de inundación conocida

| Activos afectados en zonas con mancha de inundación conocida | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
| 10 | 4.497.601,94 € | 4.691.600,23 € | 4.655.698,91 € | 4.926.823,64 € |
| 100 | 48.916.726,49 € | 50.107.861,60 € | 50.156.603,59 € | 53.931.384,28 € |
| 500 | 69.479.719,40 € | 71.050.751,00 € | 71.728.320,79 € | 75.006.496,94 € |
| DAE analítico | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € | 4.462.603,20 € |
| DAE numérico | 2.877.230,56 € | 2.950.610,23 € | 2.954.093,31 € | 3.164.370,88 € |

Tabla 46. Activos afectados en zonas con mancha de inundación conocida

| Personas potencialmente afectadas | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
| 10 | 168 | 326 | 806 | 3.146 |
| 100 | 2.530 | 5.013 | 7.614 | 11.311 |
| 500 | 3.618 | 6.940 | 9.864 | 13.656 |

Tabla 47. Personas potencialmente afectadas

| Activos potencialmente afectados | | | | |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| T. Retorno | 0,25m | 0,5m | 1m | 2m |
| 10 | 8.444.036,96 € | 16.080.282,21 € | 39.724.404,06 € | 155.003.219,76 € |
| 100 | 124.666.976,05 € | 246.994.387,64 € | 375.126.317,84 € | 557.249.988,91 € |
| 500 | 178.267.013,69 € | 341.959.321,72 € | 485.958.108,89 € | 672.804.478,70 € |

Tabla 48. Activos potencialmente afectados

Dichos resultados no se podrán sumar y habría que evaluarlos de forma individual puesto que el método de obtención de los mismos y las hipótesis planteadas en cada uno de los casos no son los mismo, dada la incertidumbre planteada en cada una de las circunstancias.

Aun siendo estos resultados una simple estimación de las personas que se verían afectadas bajo estas circunstancias, es evidente que los daños que ocasionarían este tipo de eventos serán tangibles y en algunos casos muy difíciles de lidiar con ellos. Es por ello que para futuros trabajos



será imprescindible con proponer soluciones que ayuden a frenar o al menos mitigar las consecuencias.



7. Conclusiones

El objetivo de este análisis ha sido abordar el problema de riesgo de inundación en el Municipio de Pamplona. Para ello se ha estudiado la exposición y vulnerabilidad desde diferentes perspectivas y enfoques, comparando los resultados obtenidos con cada uno de ellos.

Las conclusiones obtenidas durante el presente proyecto son las siguientes.

I. Resultados sesgados a causa de la resolución del ráster

Se ha llegado a numerosas conclusiones durante el desarrollo del proyecto. La primera a tener en cuenta, es que a lo largo del análisis y analizando las manchas de inundación iniciales y los planos solución que representan la población afectada, se concluye que puede que parte de los resultados esté sesgados, todo ello debido a la alta resolución tanto del ráster de inundación como la de la capa del catastro de navarra (1m). Esto significa que, dado el alto nivel de detalle de la mancha de inundación, hay zonas edificadas que el ráster nunca llega a inundar, sino que rodea dichas edificaciones. Al colocarse tanto la población como el stock en dichas superficies, es evidente que nunca se verán afectados lo cual no es coherente. Esto afecta en mayor medida enfoque 2 como al 3, ya que en el 1 la población no está distribuida según el catastro sino según una mancha de densidad de población.

Por tanto, en referencia a lo mencionado, como una posible mejora al análisis que se ha llevado a cabo en este trabajo, y como una posible mejora a implementar en futuros análisis sería intentar corregir la mancha, interpolando la cota de inundación en dichos huecos que se han formado por la presencia de los edificios ya que realmente estos sí se verían afectados por las inundaciones.

II. Daño real en el intervalo de resultados obtenidos

Las consecuencias reales que acarrearía un evento de inundación se encuentran entre los resultados obtenidos mediante el enfoque 1 y los obtenidos en el enfoque 2 y 3. Por tanto se podría tomar dichos resultados como una cota superior e inferior del daño que se estima realmente.

Esta inexactitud en el cálculo se debe por un lado a lo explicado previamente, lo cual genera unos resultados de daño inferiores a los reales. Y por otro lado, al modo de representación de la población propuesto en el primer enfoque, ya que reparte la población como una mancha de densidad de población sobre toda la superficie del edificio, colocando valor, en lugares donde verdaderamente no lo hay. Por ello se obtienen unos valores de daño superiores a los reales.

III. Mayor precisión en los resultados al aumentar el nivel de detalle

Se realizaron tres enfoques diferentes a la hora de evaluar la exposición de la población y activos residenciales, comprobando que a mayor precisión en la distribución de los mismos más se acercaría el resultado a la realidad.

Por tanto, los resultados obtenidos en el DAE para el caso del enfoque 3 son mucho más objetivos y realistas que los obtenidos en el enfoque 1, ya que el enfoque 3 tenía en cuenta



tanto la distribución de las edificaciones en la superficie del municipio, como la altura de cada uno de ellos.

IV. Recomendable aumentar el número de periodos de retorno de estudio para mejorar el DAE

La hora de obtener el DAE mediante dos métodos diferentes, el método analítico y el método numérico, se observan grandes diferencias entre uno y otro, esto se debe a la escasez de puntos discretos que representan la curva. Disponer de una mayor cantidad de periodos de retorno, proporcionaría la obtención de mayores puntos sobre la gráfica que contribuirían a que el método numérico de obtención del DAE se acercase más al resultado obtenido mediante el método analítico. Como se ha mostrado en la figura 69, esto genera grandes incertidumbres a la hora de obtención del DAE.

Por tanto, se recomienda para futuros estudios el uso de mayor cantidad de periodos de retorno, que se encuentren más próximos unos de otros, de tal forma que se obtengan puntos en la gráfica más próximos, y con ellos resultados más óptimos, ya que la curva solución será más precisa.

V. El riesgo de inundación aumenta considerablemente con el cambio climático

El en último punto del análisis realizado, referente a al aumento del riesgo a causa del cambio climático. Representando el cambio climático como un incremento de la cota de inundación, se comprueba y concluye que la cantidad de elementos afectados, tanto población como activos residenciales aumenta exponencialmente al aumentar la cota de inundación, y con ello la superficie inundada.



8. Bibliografía

- AS/NZS-4360. 2004. Sydney and Wellington, Standards Australia/Standards New Zealand.
- EMA. 1998. Australian Emergency Management Glossary. Canberra, Emergency Management Australia.
- EMA. 2004. Emergency Risk Management Applications Guide. Canberra, Emergency Management Australia.
- Schneiderbauer y Ehrlich, 2004. Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards: a Review of Definitions, Concepts and Data.
- IUGS. 1997. Quantitative risk assessment for slopes and landslides.
- Oliveira. 2006. Assessing and managing earthquake risk : geo-scientific and engineering knowledge for earthquake risk mitigation.
- DPAE. 2006. Decreto 423. Por el cual se adopta el Plan Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias para Bogotá D. C. A. M. d. B.-S. d. Gobierno. Bogotá, Colombia.
- Banco Mundial. 2013. Modelización probabilística para la gestión del riesgo de desastres. El caso de Bogotá, Colombia.
- COAG. 2004. Natural Disasters in Australia. Reforming Mitigation, Relief and Recovery Arrangements.
- Blaikie. 1994. At Risk. Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters. London and New York, Routledge.
- Bohle. 2001. Vulnerability and criticality: Perspectives from social geography.
- Hungr, 2005. Landslide Risk Management: proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management. Vancouver, Canada, Taylor & Francis.
- Wilches-Chaux, G. 1988. "La vulnerabilidad global."
- Adger, 2004. New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. Anglia, Norwich, University of East. Tyndall Centre for Climate Change Research
- Twigg, J. 2001. Physician, heal thyself? The politics of disaster mitigation. Disaster Management Working Paper 1/2001. London, Benfield Hazard Research Centre
- Timberlake y Wijkman. 1985. Desastres Naturales ¿Fuerza Mayor u Obra del Hombre?
- Anders Skovgård Olsen. 2014. Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments
- Gonzalez Moreno. 2011. Simulación de los episodios de avenida en el río Arga a su paso por pamplona mediante HEC-HMS
- SNCZI-IPE. 2018. Mapa de peligrosidad de inundación de origen fluvial escenario T=10 años.
- Gobierno de España. 2017. Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones.



- Gobierno de España. 2016. Informe de seguimiento del plan de gestión del riesgo de inundación de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro.
- Perles Rosello. 2010. Apuntes para la evaluación de la vulnerabilidad social frente al riesgo de inundación.
- Bescós y Camarasa. 2004. La creciente ocupación antrópica del espacio inundable y el aumento de la vulnerabilidad en las poblaciones del bajo Arga (Navarra).
- Cardoso. 2017. Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético. Caso de distritos bajo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina.
- Martínez Fernández. 2015. Los efectos del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones en España.